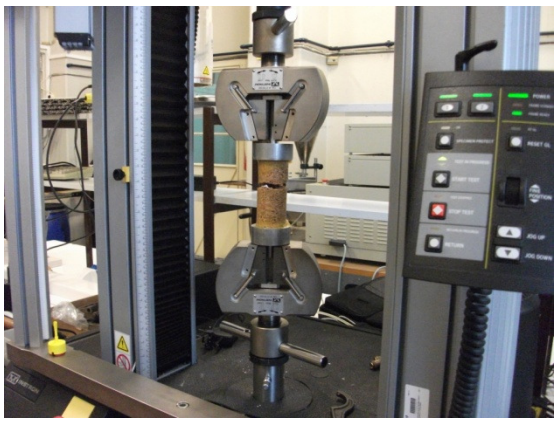
INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



Desenvolvimento, caracterização e avaliação do comportamento termo-mecânico de um novo material constituído principalmente por cortiça

Daniel Tiago Grifo Esteves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Mestrado Integrado - Engenharia Mecânica

Júri

Presidente:	Prof. Luís Manuel Varejão Oliveira Faria
Orientador:	Prof. Luís Filipe Galrão dos Reis
Co-orientador:	Prof. João Luís Toste Azevedo
Vogais:	Prof. Manuel Freitas

Outubro de 2010

Agradecimentos

Gostaria de deixar aqui expressa a minha total gratidão a todas as pessoas que me apoiaram e que tornaram possível a realização deste trabalho.

Quero agradecer ao professor doutor Luís Reis, pelo grande apoio, disponibilidade e boa disposição, que sempre me foi demonstrado ao longo da realização deste trabalho.

Ao professor doutor João Toste tenho de agradecer toda a ajuda na realização dos ensaios de condutividade térmica.

O responsável pela empresa Sá Rosas SA, o sr. Eduardo Veiga de Macedo, foi uma pessoa impecável, demonstrando isso na forma como me acolheu na empresa, no tratamento diário e nas condições que me proporcionou dentro e fora das instalações. Tive o prazer de conhecer parte da sua família, a qual também merece o meu agradecimento pela forma como me receberam em casa.

Por fim, à minha família, principalmente os meus pais e a minha madrinha, que estiveram sempre a par do meu percurso, eu agradeço imenso a vossa ajuda e apoio.

Resumo

A cortiça é um material que tem acompanhado várias gerações, distinguindo-se bem cedo em aplicações ligadas à construção, nos países mediterrânicos, de onde provém. Esta ''herança'' faz de Portugal líder mundial na produção, transformação e exportação de cortiça, sendo, portanto, importante que no nosso país se realizem estudos aprofundados ligados a este material, nomeadamente através da criação de novos materiais que tenham como material base a cortiça.

Este trabalho tem como objectivo desenvolver, caracterizar e avaliar o comportamento termo-mecânico de novos materiais/produtos tendo como material base a cortiça. Para isso, e tendo como referencia características e propriedades já disponibilizadas pelo mercado, será necessário realizar várias análises, cujas propriedades determinadas serão avaliadas de modo a que se façam novos ensaios para melhorar ainda mais as propriedades do novo material.

Pretende-se que este material contenha propriedades que satisfaçam as necessidades, preferencialmente, a nível acústico, mecânico e de isolamento. Para isso, foram realizados vários ensaios. A nível mecânico foram realizados ensaios de tracção, compressão, flexão e torção. Para o isolamento, foi determinada a humidade presente no tubo e a sua condutividade térmica. Já nos laboratórios do ISQ e no Centro Tecnológico da Cortiça, foram realizados também ensaios de condutividade térmica, envelhecimento, entre outros.

Os resultados apresentados mostram que o novo produto tem um enorme potencial apresentando propriedades muito promissoras tanto a nível mecânico e térmico, sendo um forte rival dos actuais materiais plásticos para revestimentos e isolamentos.

A principal conclusão que se pode retirar após a realização deste trabalho, é de que existe margem para inovar na criação de novos produtos, tendo como material base a cortiça.

Palavras Chave:

Cortiça
Ensaios experimentais
Isolamento
Resistência termo-mecânica
Condutividade térmica

Abstract

Cork is a material that has followed several generations, distinguishing itself early in the construction-related applications, in the Mediterranean countries, where it is from. This "inheritance" makes Portugal a world leader in the production, processing and export of cork, and is therefore important that in our country are carried out extensive studies related to this material; including the creation of new materials has the cork as a base material.

This work aims to develop characterize and evaluate the thermo-mechanical behavior of new materials / products having as base material cork. For this, and taking as reference characteristics and properties already available in the market, will need to perform several tests whose properties will be evaluated in certain order to the making of new tests to further improve the new material properties.

It is intended that this material contains properties that meet the needs, mainly, at acoustic, mechanical and insulation levels. For this, more tests were performed. The mechanical level were carried out tensile tests, compression, flexural and torsion. For isolation, must be given the moisture present in the tube and its thermal conductivity. Already in the laboratories of ISQ and Centro Tecnológico da Cortiça, were also conducted tests of thermal conductivity, aging, among others.

The results show that the new product has huge potential, showing very promising properties both mechanical and thermal, with a strong rival of the current plastics for coatings and insulations

The main conclusion that can be drawn after this work is that there is margin for innovation in creating new products has the cork as a base material.

Keywords:

Cork
Experimental tests
Isolation
Thermo-mechanical resistance
Thermal conductivity

Índice

Agradecimentos i
Resumo iii
Palavras Chave iii
Abstract v
Keywords v
Lista de Figuras xi
Lista de Tabelas xv
Lista de Símbolos xvii
Lista de Programas xvii
1. Introdução 1
2. Revisão bibliográfica 3
2.1. A Cortiça 3
2.2. Caracterização da Cortiça e sua proveniência 4
2.2.1. A origem da cortiça 4
2.2.2. Estrutura Celular da Cortiça 5
2.2.3. Composição Química da Cortiça 8
2.2.4. O Sobreiro 9
2.2.5. Montado de sobro 9
2.3. Importância para a Economia de Portugal 11
2.4. Características e propriedades macroscópicas da Cortiça 13
2.5. Etapas da produção de Cortiça 14
2.5.1. Descortiçamento 14
2.5.2. Período de repouso 15
2.5.3. Percurso Industrial 15
2.6. Aglomerados e Granulados de Cortiça 16
2.7. Campos de aplicação 18
2.7.1. Da cortiça 18
2.7.2. Dos aglomerados de cortiça 19
2.8. Produtos Constituídos Por Material Base a Cortiça 20
2.9. A Empresa 20
2.9.1. Produção do Aglomerado 20
2.9.2. CorkFlex- Isolamento em cortiça 25
2.10. Ensaios a nível energético 25
3. Procedimento Experimental, Material e Equipamento 29

3.1. Produção dos tubos na empresa 29
3.1.1. Produção do Aglomerado 29
3.1.2. Realização dos provetes 29
3.1.3. Aglomerante 29
3.2. Ensaio de compressão nos laboratórios do DEM 30
3.2.1. Descrição do ensaio 30
3.2.2. Condições de ensaio 31
Ensaio de flexão a 3 pontos 32
3.2.3. Descrição do ensaio 32
3.2.4. Condições de ensaio 33
3.3. Ensaio de tracção 34
3.3.1. Descrição do ensaio 34
3.3.2. Condições do ensaio 36
3.4. Ensaio de torção 37
3.4.1. Descrição do ensaio 37
3.4.2. Condições de ensaio 38
3.5. Ensaio de Teor de Humidade 39
3.6. Ensaio de Condutividade Térmica 40
3.6.1. Determinação da condutividade térmica nos laboratórios do DEM 40
3.6.2. Determinação da condutividade térmica no ISQ 40
3.7. Ensaios de determinação da resistência ao calor 41
3.8. Ensaios de Envelhecimento Acelerado 41
3.9. Ensaios com Materiais Sujeitos a Altas Temperaturas 41
3.10. Análise microscópica dos materiais 42
4. Resultados e Discussão 43
4.1. Ensaios de teor de humidade 43
4.1.1. Determinação da densidade e variação de volume 43
4.1.2. Discussão dos resultados 45
4.2. Ensaios de condutividade térmica 46
4.2.1. Ensaios nos laboratórios DEM 46
4.2.2. Ensaios nos laboratórios ISQ 47
4.2.3. Discussão dos resultados 49
4.3. Ensaios de determinação da resistência ao calor 50
4.3.1. Temperatura Máxima de Exposição 50
4.3.2. Discussão dos resultados 51
4.4. Ensaios de compressão 51
4.4.1. Tubos de referência 45/25 52

4.4.2. Tubos de referência 65/25 56
4.4.3. Análise do material sujeito a elevadas temperaturas 59
4.4.4. Analise do material sujeito a condições de humidade 61
4.4.5. Análise dos resultados 63
4.5. Ensaios de Flexão a 3 pontos 66
4.5.1. Tubos de referência 45/25 66
4.5.2. Tubos de referência 65/25 67
4.5.3. Análise do material sujeito a Elevadas temperaturas 68
4.5.4. Análise do material sujeito a condições de humidade 70
4.5.5. Análise dos resultados 72
4.6. Ensaios de Tracção 73
4.6.1. Tubos de referência 45/25 73
4.6.2. Tubos de referência 65/25 74
4.6.3. Análise dos Resultados 75
4.7. Ensaios de Torção 76
4.7.1. Tubos de referência 45/25 77
4.7.2. Tubos de referência 65/25 77
4.7.3. Analise dos resultados 78
4.8. Análise Microscópica 79
4.9. Comparação dos materiais analisados com alguns existentes no mercado 80
5. Conclusões e Futuros Desenvolvimentos 81
Referências 83
Anexo A- Propriedades Médias da Cortiça [13] 85
Anexo B- Principais propriedades de materiais plásticos [29] 86
Anexo C- Propriedades do Poliuretano 87
Anexo D- Constituição, volume e massa volúmica dos aglomerados 88
Anexo E- Normas de produção 91
Anexo E1- Norma Portuguesa NP 115 91
Anexo E2- Norma Portuguesa NP 606 92
Anexo E3- Norma Portuguesa NP 1994 93
Anexo F - Ensaio de condutividade térmica no DEM 96
Anexo F1- Modo de preparação do ensaio 96
Anexo F2- Resultados 98
Anexo G- Dimensões dos apoios para os provetes para os ensaios de tracção e torção 100
Anexo H- Analise microscópica 101
Anexo H1- Grão 2-4 mm 101
Anexo H2- Grão 1-2 mm 102

Anexo H3- Grão 0,2-2 mm.....103
Anexo H4- Grão 0,2-1 mm.....104
Anexo H5- Grão 2-6 mm.....105

Lista de Figuras

Figura 1- Selo de cortiça..... 4
Figura 2- Disposição das células da cortiça a) [14] ; b) [2]..... 6
Figura 3- Parede celular da cortiça, a) diferenciação das camadas da parede; b) definição das paredes na secção tangencial; c) secção transversal [9]..... 6
Figura 4- Nomenclatura das direcções e secções da cortiça [13]..... 7
Figura 5- Visualização das células da cortiça amadia nas 3 principais secções, a) secção tangencial; b) secção transversal; c) e d) secção radial [13]..... 7
Figura 6- Identificação da estrutura do tronco do sobreiro [5]..... 8
Figura 7- Fases da vida de um sobreiro; a) infância; b) maturidade; c) velhice [2]..... 9
Figura 8- Localização dos montados em Portugal e à volta do mediterrâneo [2].....10
Figura 9- Distribuição de produção de cortiça em Portugal em percentagem [2, 18].....11
Figura 10- Valor e Quantidade de exportações e importações em Portugal [2].....12
Figura 11- Valor dos principais produtos de cortiça exportados em Portugal [2].....12
Figura 12-Fases do descortiçamento, a) abrir; b) e c) separar [1].....14
Figura 13- a) Rabaneação; b) Brocagem [2].....16
Figura 14- Marcação [2].....16
Figura 15- a) Aglomerado branco; b) Aglomerado negro [2].....17
Figura 16- Utensílios em cortiça, a) garrafeira; b) calçado; c) tapete de rato; d) almofadas; e) roupa; f) e g) cadeiras.....18
Figura 17- Aparas de cortiça depois do corte para rolhas.....21
Figura 18- Máquina de trituração, a) vista lateral; b) vista superior com destaque à trituração.....21
Figura 19- a) aferidor de broken; b) moinho.....21
Figura 20- Vista exterior do secador ja na parte final de secagem.....22
Figura 21- Segunda moagem; a) grânulos directamente encaminhados para o 2º moinho; b) 2º moinho, localizado na andar de baixo.....22
Figura 22- Aferidor granulometrico.....23
Figura 23- Aferidores volumétricos, a) colocação dos grânulos em sacos; b) regulador de densidade responsável pela separação dos grânulos.....23
Figura 24- Transformação em aglomerados.....24
Figura 25-a) Produção dos bastões; b) Depósito dos bastões.....24
Figura 26- Corte dos bastões.....25
Figura 27- Distribuição de temperaturas durante transferência de calor em placas planas [25].....27
Figura 28- Relação da espessura com o fenómeno da condensação [26].....27
Figura 29- Ensaio de compressão uniaxial, a) aplicação de carga; b) idealização das curvas de compressão; c) curvas tensão-extensao em compressão radial (R) e não radial (NR) [13].....30

Figura 30- Equipamento utilizado para o ensaio de compressão.....32
Figura 31- Distâncias entre apoios e carga de aplicação.....33
Figura 32-Equipamento e provete para ensaio de flexão em 3 pontos.....34
Figura 33- Ensaio de tracção, a) alongamento do provete, b) fixação do provete [14].....35
Figura 34- Curvas tensão-extensão no ensaio de tracçao nao radial e radial [14].....36
Figura 35- Equipamento e provete para ensaio de tracção 36
Figura 36- Efeito da aplicação de um momento torsor, a) no cilindro; b) relação momento torsor e ângulo de torção.....37
Figura 37- Ensaio de torção com momento torsor em função do ângulo de torção, a) rolhas de cortiça natural segundo o eixo radial (R) e não radial (NR); b) rolhas de aglomerado de cortiça [14] 38
Figura 38- Máquina, provete e apoios na realização do ensaio de torção 39
Figura 39- a) e b) Aparelhos e modo de funcionamento do processo para determinação da condutividade térmica.....40
Figura 40- Marcas de queimaduras nos tubos de cortiça devido às altas temperaturas 42
Figura 41- a) aparelho microscópico; b) local onde se coloca o material para análise 42
Figura 42- Descrição do ensaio para determinação da temperatura máxima.....50
Figura 43- Ensaio de compressão: a) montagem inicial; b) evolução do ensaio de compressão; c) fase final de compressão; d) remoção do provete e suas dimensões depois de ensaiado.....51
Figura 44- Curvas de tensão-extensão em compressão para diferentes velocidades do grão 0,2-1mm.52
Figura 45- Curvas de tensão-extensão em compressão para diferentes velocidades do grão 0,2-2 mm52
Figura 46- Curvas de tensão-extensão em compressão para diferentes velocidades do grão 1-2 mm...53
Figura 47- Curvas de tensão-extensão em compressão para diferentes velocidades do grão 2-4 mm...53
Figura 48-Curvas tensão-extensão em compressão para diferentes grãos à velocidade de 0,6mm/min 53
Figura 49- Curvas tensão-extensão em compressão para diferentes grãos à velocidade de 1,5mm/min 54
Figura 50- Curvas tensão-extensão em compressão para diferentes grãos à velocidade de 5mm/min..54
Figura 51- Curvas de compressão do grão 2-6mm para diferentes velocidades 56
Figura 52- Curvas de compressão dos materiais de grão 2-4 mm e 2-6 mm à velocidade 0,6mm/min.57
Figura 53- Curvas de compressão dos materiais de grão 2-4 mm e 2-6 mm à velocidade 1,5mm/min.57
Figura 54- curva de compressão dos materiais de grão 2-4mm e 2-6mm para a velocidade 5mm/min 57
Figura 55- Curvas de compressão para o material de tamanho de grão 2-4mm, em condições de temperatura ambiente e depois de sujeito a ambiente com elevada temperatura (150°C).....59
Figura 56- Curvas de compressão para o material de tamanho de grão 1-2 mm, em condições de temperatura ambiente e com elevada temperatura (150°C) 60
Figura 57- Curvas de compressão para o material de grão 2-4mm em diferentes condições de humidade.....61

Figura 58- Curvas de compressão para material de grão 1-2mm em diferentes condições de humidade 61
Figura 59- Curvas de compressão do material de grão 2-6mm em diferentes condições de humidade.61
Figura 60- Diferentes fases no ensaio de flexão: a) inicio do ensaio sem qualquer carga aplicada; b) aplicação inicial de uma força; c) provete já flectido; d) estado do provete momentos antes da ruptura 66
Figura 61-Curvas Força-deformação em flexão a 3 pontos para diferentes tamanhos de grão.....67
Figura 62- Curvas Força-deformação para flexão em 3 pontos para os materiais de tamanho de grão 2-4 mm e 2-6 mm.....68
Figura 63- Curva Força-deformação para a flexão a 3 pontos comparando materiais de tamanho de grão 2-4 mm sujeitos a condições normais (temperatura ambiente) e materiais sujeitos a altas temperaturas (150°C).....69
Figura 64- Curva Força-deformação para a flexão a 3 pontos comparando materiais de tamanho de grão 1-2 mm sujeitos a condições normais (temperatura ambiente) e materiais sujeitos a altas temperaturas (150°C).....69
Figura 65- Curva Força-deformação do grão 2-4 mm em diferentes condições de humidade 70
Figura 66- Curva Força-deformação para o grão 1-2mm em diferentes condições de humidade.....70
Figura 67- Curva Força-deformação para o grão 2-6mm em diferentes condições de humidade.....71
Figura 68- Descrição do processo de tracção: a) condições iniciais; b) inicio do ensaio; c) inicio da ruptura; d) fim do ensaio com ruptura completa.....73
Figura 69- Curva Força-extensão para os diferentes tipos de grão no ensaio de tracção.....74
Figura 70- Curva Força-extensão para os grãos 2-4mm e 2-6mm em tracção.....75
Figura 71- Ensaio de torção: a) condição inicial sem aplicação de qualquer binário; b) inicio do ensaio; c) inicio da ruptura; d) fim do ensaio.....76
Figura 72- Momento torsor em função do ângulo de torção para materiais com 10mm de espessura de isolamento.....77
Figura 73- Momento torsor em função do ângulo de torsão para os grãos 2-4mm e 2-6mm.....78
Figura 74- Observação microscópica das células de cortiça.....79
Figura 75- Lista geral de comparação para várias características dos diferentes materiais estudados ..81

Lista de Tabelas

Tabela 1- Número de empresas e sua distribuição no país [2]..... 5
Tabela 2- a) Área de Montado de Sobro nos principais países produtores [2, 10]; b) Produção de cortiça nos principais países [2, 18].....10
Tabela 3- Variação do preço da cortiça dependendo da forma como é entregue [6, 18].....13
Tabela 4- Período de tempo de aquecimento.....42
Tabela 5- Condições iniciais para os ensaios de humidade.....43
Tabela 6- Valores da densidade e percentagem em peso durante o ciclo de 2 horas de imersão e 2 horas de secagem.....44
Tabela 7- Valores da densidade e percentagem em peso durante o ensaio de 24 horas de imersão e 24 horas de secagem.....44
Tabela 8- Dimensões das amostras.....46
Tabela 9- Resultados para o grão 2-4 mm.....46
Tabela 10- resultados para o grão 1-2 mm.....47
Tabela 11- resultados para o grão 2-6 mm.....47
Tabela 12- Condições iniciais para a amostra analisada de tamanho de grão 2-4 mm no ISQ.....48
Tabela 13- Valores obtidos no ensaio com a correspondente condutividade térmica.....48
Tabela 14- Processamento de dados para a determinação da condutividade térmica em função da temperatura média do Pipe.....49
Tabela 15- Modulo de elasticidade dos materiais para velocidades diferentes.....54
Tabela 16- Analise de parâmetros relativos à compressão para os diferentes grãos em relação à velocidade.....55
Tabela 17- Analise de parâmetros relativos à compressão para o mesmo grão com velocidades diferentes.....55
Tabela 18- Dimensões dos provetes antes e depois de submetidos ao ensaio de compressão.....56
Tabela 19- Analise de parâmetros relativos à compressão para o grão 2-4mm e 2-6mm com velocidades diferentes.....58
Tabela 20- Modulo de Elasticidade para os materiais de tamanho de grão 2-4mm e 2-6mm para velocidades diferentes.....58
Tabela 21- Dimensões dos provetes após finalização do ensaio.....59
Tabela 22- Analise de parâmetros relativos à compressão para o grão 1-2mm e 2-4mm sujeito ou não a condições com elevadas temperaturas.....60
Tabela 23- Modulo de Elasticidade dos materiais de tamanho de grão 1-2mm sujeitos ou não a condições com elevadas temperaturas.....60
Tabela 24- Analise de parâmetros relativos à compressão para o grão 2-4mm, 1-2mm e 2-6mm para diferentes condições de humidade.....62

Tabela 25- Modulo de Elasticidade para os materiais em diferentes condições de humidade.....62
Tabela 26- Dimensões dos provetes depois do ensaio de compressão com materiais sujeitos ao ciclo de humidade (2 horas imersão 2 horas forno).....63
Tabela 27- Dimensões dos provetes depois do ensaio de compressão com materiais sujeitos a 24 horas de imersão e 24 horas de secagem.....63
Tabela 28-Analise de parâmetros relativos à flexão a 3 pontos para diferentes grãos.....67
Tabela 29- Módulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os diferentes materiais 67
Tabela 30- Analise dos principais parâmetros na análise à flexão dos materiais de tamanho de grão 2-4mm e 2-6mm 68
Tabela 31- Modulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os materiais de tamanho de grão 2-4mm e 2-6mm 68
Tabela 32- Analise dos principais parâmetros na análise à flexão dos materiais de tamanho de grão 2-4mm e 1-2mm sujeitos a diferentes temperaturas.....69
Tabela 33- Modulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os materiais de tamanho de grão 2-4mm e 1-2mm sujeitos ou não a diferentes temperaturas.....70
Tabela 34- Análise dos principais parâmetros na análise à flexão dos materiais de tamanho de grão 2-4 mm, 1-2 mm e 2-6 mm sujeitos a diferentes condições de humidade.....71
Tabela 35- Módulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os diferentes materiais sujeitos a diferentes condições de humidade 71
Tabela 36- Valores dos principais parâmetros analisados no ensaio de tracção 74
Tabela 37- Modulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os diferentes materiais 74
Tabela 38- Principais parâmetros de análise em tracção do grão 2-4mm e 2-6mm 75
Tabela 39- Modulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os grãos 2-4 mm e 2-6 mm.....75
Tabela 40-Comparação dos Módulos de Elasticidade para tracção e flexão dos materiais.....76
Tabela 41- Análise do Torque máximo e do ângulo de torção máximo para materiais com 10mm de espessura 77
Tabela 42- Análise do Torque máximo e do ângulo de torção máximo para os grãos 2-4 mm e 2-6 mm 78
Tabela 43- Comparação das propriedades de diferentes materiais [5].....80

Lista de Símbolos

A_l Alongamento

L_f Comprimento final

L_0 Comprimento inicial

I_m Momento de inércia

D Diâmetro do círculo

y Distancia ao eixo

M Momento máximo

M_r Momento de ruptura

k Condutividade térmica

q Transferência de calor

d Espessura da parede

A Área onde actua atransferência de calor

ΔT Variação de temperatura

R Resistência

U Variação de potencial

I Intensidade de corrente eléctrica

q'' Densidade de fluxo de calor

θ_e Temperatura exterior

θ_i Temperatura interior

R'' Resistência térmica por área

h_i Coeficiente superficial de transmissão de calor interior

h_e Coeficiente superficial de transmissão de calor exterior

θ_{se} Temperatura de superfície exterior

θ_{si} Temperatura de superfície interior

θ_r Temperatura de orvalho

r_i Raio interior

r_e Raio exterior

Lista de Programas

Solid Works

1. Introdução

"Quem se preocupa com os seus netos, planta um sobreiro" [1].

Um velho ditado que passa de geração em geração, uma simples frase, mas com um enorme significado. Portugal continua a ser líder na produção, transformação e exportação de cortiça, muito favorecido pela sua localização geográfica, mas sem dúvida, um enorme esforço ao longo dos anos para o seu contínuo desenvolvimento. Mas o sobreiro não se limita só à produção da cortiça. Tal como todas as árvores o sobreiro produz oxigénio, mas como nenhuma outra é constituído por uma estrutura celular única, permitindo a retenção do dióxido de carbono, prevenindo o aquecimento global e contribuindo para o equilíbrio do clima. A cortiça tem características importantes que ajudam a cuidar do ambiente: reciclável e quimicamente inerte. A paisagem deslumbra turistas, fauna e flora que se desenvolve e prevalece no Montado, mostrando a riqueza de biodiversidade ambiental. Uma riqueza que tem sido bem aproveitada pelo nosso país, mas onde a concorrência entre as varias empresas que disputam a sua liderança nas vendas e as constantes solicitações de mercado, fazem com que as mesmas não se limitem só à sua produção em massa, mas também a uma produção com vista a novas aplicações. Aplicações estas, que levam à criação de produtos com melhor desempenho, recorrendo por isso a novos estudos e novos processos de fabrico [2-5].

Este trabalho tem como finalidade obter um ou mais produtos, que tenham como material base a cortiça, com as características desejáveis para o campo de aplicação em que se pretendem utilizar. A forte concorrência estimula as empresas a conseguir algo novo, algo útil e com a garantia de venda.

A indústria da cortiça tinha como principal saída a produção de rolhas. Neste momento, já são inúmeras as aplicabilidades da cortiça: garrafeiras, sapatos, bases, tapetes de ratos, roupas em cortiça, almofadas, cadeiras, pavimentos, etc… e o continuo estudo deste material e produtos finais resultantes da sua conjugação levará ainda ao aumento do número de aplicações [6].

Materiais constituintes de cortiça rendem cerca de 800 milhões de euros de produtos fabricados para o exterior, sendo 90% da produção total exportada do nosso país. O sector rolheiro contribui com 75% das exportações de materiais de cortiça. Resumidamente, este é um sector no qual Portugal tem de continuar a investir e desenvolver para mantermos a nossa liderança, não só em qualidade mas também em quantidade [2,4].

Este trabalho tem como objectivo desenvolver, caracterizar e avaliar o comportamento mecânico do novo material ou produto perante especificações de projecto já pré-determinadas. No desenvolvimento do novo produto, pretende-se avaliar o desempenho de determinadas propriedade físicas e mecânicas como a condutividade térmica, flexibilidade, durabilidade, resistência ao calor, pegadas ecológicas, etc.

A presente dissertação contem 5 capítulos incluindo este capítulo introdutório.

O capítulo 2 será dividido em vários subcapítulos, descrevendo-se inicialmente a evolução histórica da cortiça no país e no mundo. Seguidamente, de uma forma detalhada, será explicado todo o processo que envolve a produção da cortiça, do granulado e do aglomerado, como também as principais características e defeitos destes materiais. Todos os ensaios a que o material vai ser submetido, serão também descritos de forma a definir os parâmetros que são importantes para definir as principais propriedades do material. Por fim, será descrito o sistema de funcionamento da empresa onde os tubos de ensaios foram realizados.

O capítulo 3 tem como objectivo descrever todo o procedimento e os materiais analisados, desde a produção dos tubos na empresa (constituintes, processo de produção e maquina envolvida), até aos ensaios realizados nos laboratórios do DEM, onde serão descritas as normas pelas quais se seguiram os procedimentos para a realização dos testes e as maquinas envolvidas.

O capítulo 4 terá todos os resultados obtidos, com a sua consequente análise. Serão estudados quatro tubos com a mesma espessura, 10 mm, e também um tubo com 20mm de espessura, tendo sempre como principal objectivo o estudo do material com tamanho de grão a variar entre os 2 a 4 mm. Para os primeiros ensaios com espessura de parede de 10mm, serão analisados provetes com quatro tamanhos de grão diferentes. Os vários provetes serão submetidos a diversos ensaios, tanto para a determinação das propriedades mecânicas, como de isolamento e humidade.

O capítulo 5 resume as especificações dos vários materiais analisados, podendo-se concluir a que campos de aplicação se adequam mais cada material. Como se pretende lançar no mercado um novo produto, será este a base de comparação com todos os outros analisados.

O resultado que se espera atingir é a especificação do novo material, definindo os seus constituintes e também a caracterização mecânica e térmica do novo material. A definição das propriedades dos materiais permite, para futuros testes, um ajuste tanto no tamanho de grão como no aglomerante de modo a que se torne possível conjugar todas as vantagens que advenham de determinados materiais e melhorar a sua aplicabilidade.

2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo serão descritos vários parâmetros relacionados com este material, como os seus antecedentes históricos, a sua evolução no mercado, as suas principais características, bem como as etapas na sua produção até chegar ao mercado.

2.1. A Cortiça

A maior parte das pessoas pensa que as primeiras aplicações em cortiça foram as rolhas, mas muito antes, há 5000 anos, a cortiça era utilizada para aparelhos destinados à pesca, na China, Babilónia, Egipto e Pérsia. Mais tarde, no século IV a.C., foram encontrados vários artefactos em Itália, como bóias, sapatos de mulher e mesmo nos telhados. Finalmente, é que foi encontrada uma garrafa que tinha uma rolha em cortiça, isto datado do século I a.C. [2,7].

No século I, o naturalista romano escreveu o primeiro documento sobre o sobreiro, onde se destaca a sua importância na civilização grega como um símbolo de liberdade e de honra, em que só os sacerdotes o poderiam cortar [2].

Muito mais tarde, já no século XIII, foram impostas em Portugal as primeiras leis agrárias que protegiam os montados de sobro [2].

Alem da extracção de cortiça, a madeira do sobreiro também começou a ter uma grande importância na altura das descobertas. Os construtores de embarcações utilizavam-na na construção das partes mais expostas às intempéries, dada a sua resistência e ao facto de nunca apodrecer [2].

Já no século XVIII, foi possível obter pela primeira vez uma imagem microscópica da cortiça, feito conseguido por Robert Hooke, em Inglaterra. Nesta mesma altura, mas desta vez em França, começaram-se a usar rolhas de cortiça para as tão famosas garrafas de champanhe, feito que ainda hoje prevalece. Finalmente, na península ibérica começou a grande exploração dos montados, cuja produção era quase na totalidade para rolhas de cortiça [2,8].

Mas a grande revolução no uso da cortiça aconteceu no século XIX, com a invenção da primeira máquina de fabrico de rolhas. Seguidamente, surgem equipamentos para calibrar e contar as rolhas, e criam-se novas aplicações industriais para a cortiça, como o aglomerado branco. Esta última descoberta foi patenteada pelos americanos, que nesta altura também investiram forte na plantação de sobreiros. No final do mesmo século século, em França, foram criadas e fabricadas as primeiras rolhas de duas peças de cortiça coladas [2,8].

A partir do século XX e ate aos nossos dias, o investimento no desenvolvimento e inovação de novos produtos com base em cortiça e com vista a novas aplicações não tem parado, devido à grande concorrência no mercado como também a importância de se obterem novos produtos para novas

necessidades. Em 1903 apareceram no mercado os primeiros discos de cortiça natural e corpo de aglomerado. Cinquenta anos mais tarde, durante a Segunda Guerra Mundial, este material foi usado em muitos equipamentos militares. Também registaram-se patentes com a utilização de cortiça nas correias de transmissão e em pneus, [1].

Como nota de curiosidade, os CTT lançaram no dia 28 de Novembro de 2007 o primeiro selo de cortiça do mundo, numa edição com 230 mil unidades, com o intuito de promover este sector. Muitas foram as dificuldades para o seu fabrico, como o facto de a espessura ser muito fina, haver a possibilidade de se degradar rapidamente, ter de aguentar diferentes pressões e ainda ter no verso uma fita auto-adesiva. Infelizmente ficou de fora a possibilidade de uma nova edição, salientando que o preço unitário de cada selo foi de 1 euro. [9].

Figura 1- Selo de cortiça

Em Portugal foi fundada em 1956 a Associação Portuguesa de Cortiça, que representa e promove a Industria de cortiça do nosso país. Todas as empresas responsáveis por produção, comercialização e exportação podem estar associadas à APCOR [2,6].

Actualmente, verifica-se que em Portugal há um enorme incentivo nas empresas para o estudo de novas aplicações da cortiça, recorrendo a combinações de propriedade dos mais diversos materiais com a cortiça e também desenvolvendo projectos para novos campos de aplicação [3,10].

2.2. Caracterização da Cortiça e sua proveniência

2.2.1. A origem da cortiça

A cortiça é uma matéria-prima muito utilizada no mundo, tendo neste momento vários campos de aplicação. Desde cedo houve uma ligação da cortiça com o vinho, por isso as grandes fábricas de transformação de cortiça se localizarem no litoral do nosso país, junto a uma das zonas de produção de vinho mais demarcadas no mundo. Na tabela 1 encontra-se a localização das 242 empresas de cortiça em Portugal associadas à APCOR [2,3,6]:

Cidade	Aveiro	Évora	Faro	Lisboa	Porto	Santarém	Setúbal	Viseu	Total
Numero	195	12	11	2	3	4	14	1	242
Percent.	80,58%	4,96%	4,55%	0,83%	1,24%	1,65%	5,79%	0,41%	100%

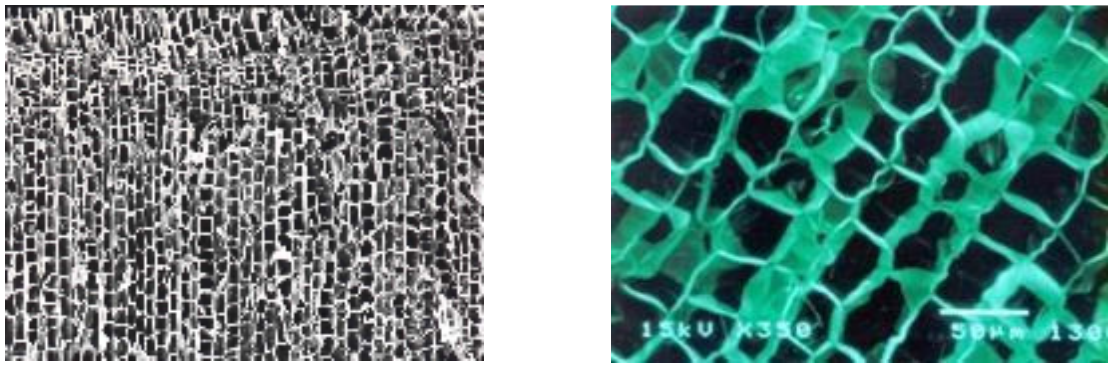
Tabela 1- Número de empresas e sua distribuição no país [2]

A cortiça tem origem nos sobreiros, que são árvores que não precisam de fertilizantes naturais, irrigação ou fertilizantes químicos e tem a grande particularidade de se regenerar. Mas são necessárias precauções na retirada da cortiça. Este trabalho tem de ser feito por pessoas experientes, normalmente num período de tempo compreendido entre Maio e Agosto, altura em que esta se desprende melhor do tronco. Em Portugal, um sobreiro pode ser descortiçado pela primeira vez 25 anos após a sua plantação, sendo esta cortiça denominada cortiça virgem, e a partir daí de 9 em 9 anos. Esta cortiça é utilizada apenas para o fabrico de aglomerados, pois contem varias irregularidades na sua estrutura e na sua superfície. O segundo descortiçamento, de onde se obtém a cortiça secundeira também não é a mais indicada. Ou seja, ao fim de 40 ou 50 anos, no terceiro descortiçamento é que a cortiça pode ser utilizada em rolhas, denominando-se essa cortiça por amadia, [2,6,11,12].

2.2.2. Estrutura Celular da Cortiça

As características mais importantes que diferenciam a cortiça de outras matérias-primas residem no tecido suberoso que a constitui. Robert Hooke aperfeiçoou um microscópio óptico que permitiu a observação microscópica da cortiça, tendo conseguido uma identificação da unidade base da estrutura das plantas (a célula), mais propriamente, dos tecidos biológicos [5,12].

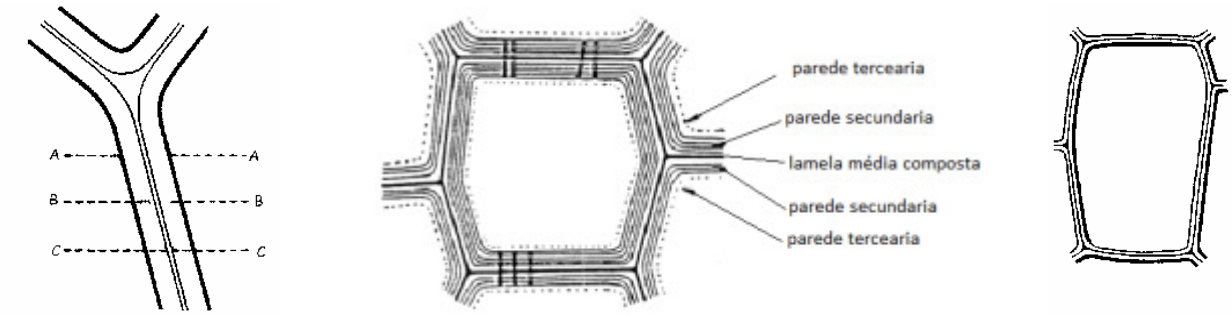
Este tecido é constituído por células de parede muito finas, dispostas de um modo compacto, sem espaços livres e também mais compridas que largas, com dimensões que variam entre 30 a 40 μm na primavera e 10 a 15 μm no Outono. Quanto á sua espessura, esta varia entre 1 e 1.25 μm nas estações Primavera e Verão e entre 2 a 2.5 μm nas outras duas. As suas formas normalmente são prismáticas, de secção hexagonal, empilhados em colunas ou fiadas. As células de cada coluna são geradas sequencialmente pela mesma célula de felogénio. Relembrando, o felogénio do sobreiro consiste numa camada, praticamente cilíndrica, de células do mesmo tipo e que apresentam na secção transversal uma forma rectangular, com o lado mais curto na direcção radial e uma forma poligonal na secção transversal. O felogénio começa a desenvolver-se sob a epiderme, formando um anel contínuo à volta da árvore. No entanto, o número de lados das células pode variar entre quatro a nove arestas. Na figura 2 é possível verificar a disposição das células, [5,14]:



a) b)

Figura 2- Disposição das células da cortiça a) [14] ; b) [2]

Mas as paredes das células não são homogéneas, resultando uma estrutura celular com alguns inconvenientes. Existem várias camadas ou lamelas que estão colocadas simetricamente em torno de uma lamela média, estando esta contida numa parede primária, que são membranas celulares de celulas vivas, representada na figura 3 c). A espessura da lamela média tem cerca de 1/10 da espessura total da parede da célula. As lamelas seguintes resultam da deposição de substâncias do citoplasma sobre as paredes primárias. Como também se pode verificar na figura 3b), existem ainda outras duas paredes, a parede secundária (B), constituida essenciamente por suberina e ceras, e também a parede terciária (A), formada à base de celulose, [5,13-16].



a) b) c)

Figura 3- Parede celular da cortiça, a) diferenciação das camadas da parede; b) definição das paredes na secção tangencial; c) secção transversal [9]

As figuras 4 e 5 têm como objectivo analisar as secções e as direcções das células da cortiça. Assim sendo, é possível verificar as diferenças estruturais das células segundo a secção tangencial (a), transversal (b) e radial (c e d). A secção tangencial é caracterizada por ser uma estrutura do tipo "favo de mel", enquanto as outras duas são semelhantes entre si, com uma estrutura do tipo "parede de tijolos", [5,14,15,16].

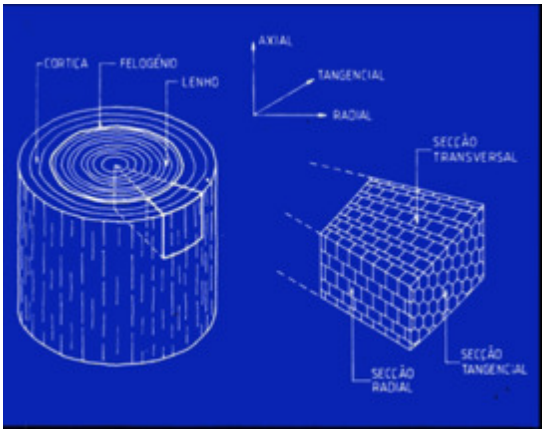


Figura 4- Nomenclatura das direcções e secções da cortiça [13]

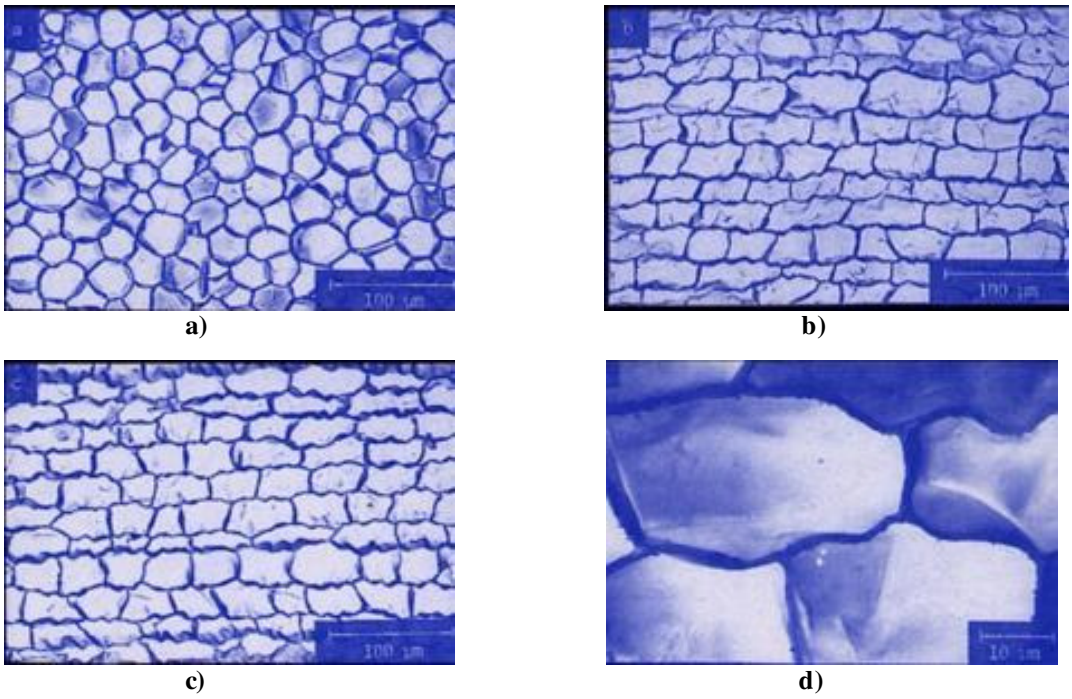


Figura 5- Visualização das células da cortiça amadia nas 3 principais secções, a) secção tangencial; b) secção transversal; c) e d) secção radial [13]

Após a extracção da cortiça, uma parte do entrecasco fica exposta, formando-se continuamente na parte interior deste camadas de células, que constituem a "raspa", sendo o principal constituinte da parte externa. A raspa seca, contrai e endurece, adquirindo fendas consoante o seu crescimento. A ultima camada de tecido anual denomina-se por "barriga" ou "ventre", sendo esta, a parte interna do tecido suberoso, distinguindo-se uma menor elasticidade nesta camada como tambem a presença de poros. [5,16]

Assim sendo, é possivel determinar a qualidade da cortiça atraves da visualizaçao da mesma. A qualidade da cortiça define-se pela homegeneidade da "massa", pela porosidade (tipo, dimensao, quantidade e distribuiçao de poros), a cor clara na cortiça virgem e tambem um composto liso, macio e de espessura reduzida na costa da cortiça amadia, [5, 12].

Na figura 6 é apresentada a identificaçao da estrutura do tronco do sobreiro.

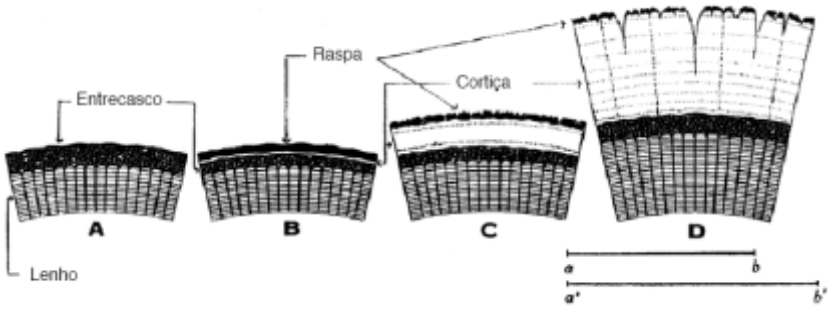


Figura 6- Identificação da estrutura do tronco do sobreiro [5]

2.2.3. Composição Química da Cortiça

Quimicamente, as paredes celulares são constituídas pelos seguintes compostos e respectivo valor médio, [2,5,11,15,16]:

-Suberina (45%)→ responsável pela sua compressibilidade e elasticidade

-Lenhina (27%)→ estrutura das paredes celulares

-Polissacáridos (12%)→ estrutura da cortiça

-Ceróides (6%)→ repelem a água e contribuem para a impermeabilidade

-Taninos (6%)→ cor, protecção e conservação do material

-Cinzas (4%)

Os três primeiros são polímeros naturais, enquanto os ceróides são moléculas mais pequenas de natureza gorda, existindo nas paredes das células da cortiça sob compostos como alcanos, alcanóis e triterpenóides. Os taninos são compostos fenólicos que aparecem numa forma polimerizada [13,14].

Quanto à suberina, sabe-se que é uma mistura de ácidos orgânicos, constituída por glicerol e ácidos gordos e tem uma estrutura tridimensional. Este oferece importantes propriedades como a impermeabilidade, isolamento e deformabilidade das células [13,14].

Quanto à lenhina e os polissacáridos, estes têm características que influenciam também o bom comportamento da cortiça. A primeira dá rigidez às paredes celulares enquanto o segundo oferece resistência mecânica [13,14].

2.2.4. O Sobreiro

O Sobreiro, cujo nome botânico é Quercus Suber L., sendo a segunda espécie mais representada no nosso país, nasce de uma semente de bolota, que também é o fruto que produz. Esta árvore cresce lentamente podendo atingir entre 10 a 20 metros de altura, com uma idade média de vida de 170 anos, sendo que muitos deles ultrapassam os 200 anos de idade. Na figura 7 é possível identificar as várias partes que constituem um sobreiro tal como o seu crescimento ao longo dos vários anos, [2,17].

a) **b)** **c)**

Figura 7- Fases da vida de um sobreiro; a) infância; b) maturidade; c) velhice [2]

2.2.5. Montado de sobro

Um conjunto plantado de sobreiros denomina-se Montado de Sobro, tendo uma enorme importância no nosso planeta. Além de produzir e libertar oxigénio, retém o dióxido de carbono, que altera as condições climáticas. Estima-se que o Montado português fixa 4,8 milhões de toneladas de dióxido de carbono por ano [12,17].

Também é o habitat natural de muitas espécies, dando alimento, abrigo e protecção. Espécies estas, como raposas, javalis, veados, lebres, como também muitas aves. Algumas em vias de extinção, necessitam dos Montados para sobreviver, como o lince ibérico e a águia imperial ibérica. Não só a fauna se desenvolve nestas áreas, mas também a flora. Deste modo, é possível se desenvolver de forma sustentável actividades como a agricultura e a pecuária [12,17].

Os sobreiros desenvolvem-se bem nas regiões com ambientes quentes e secos, com pouco chuva e Invernos suaves, sem neve. Quanto às altitudes, preferencialmente devem-se localizar abaixo dos 200 metros, mas podem-se desenvolver também ate aos 950 metros. Os tipos de solos também são determinantes para o seu bom desenvolvimento, como o caso dos solos graníticos, porfiricos ou xistosos. Por isso, estão predominantemente localizados nos países à volta do mar mediterrâneo, onde o clima é quente e húmido e os terrenos pobres, [2,8].

Na figura 8 é mostrada a localização dos montados em Portugal e à volta do mediterrâneo.

Figura 8- Localização dos montados em Portugal e à volta do mediterrâneo [2]

Os Montados de sobro ocupam uma área mundial de 2.277.700 hectares, sendo um contributo importante para a economia dos respectivos países. De um modo geral, é possível ver na tabela 2 a área ocupada em cada país tal como a produção média anual, verificando-se que Portugal tem um grande domínio neste sector,[1, 10]:

Área de Montado de Sobro			**Produção de Cortiça**		
País	**Área (hectares)**	**Percentagem**	**País**	**Produçao Méd anual (ton)**	**Percentagem**
Portugal	736,700	32,4	Portugal	157,000	52,5
Espanha	506,000	22,2	Espanha	88,400	29,5
Argelia	414,000	18,2	Italia	17,000	5,5
Marrocos	345,000	15,2	Argelia	15,000	5,2
França	92,000	4	Marrocos	11,000	3,7
Tunisia	92,000	4	Tunisia	7,500	2,5
Italia	92,000	4	França	3,400	1,1
Total	2,277,700	100	Total	299,300	100
a)			**b)**		

Tabela 2- a) Área de Montado de Sobro nos principais países produtores [2, 10]; b) Produção de cortiça nos principais países [2, 18]

Portugal contém cerca de 33% da área mundial e 23% da área florestal nacional. A zona do Alentejo é a que contem maior concentração de Sobreiros. No norte, dado o afastamento ao mediterrâneo, é diminuta a produção [2, 18].

Na figura 9 encontra-se representada a distribuição de produção de cortiça em Portugal entre 2005 e 2006.

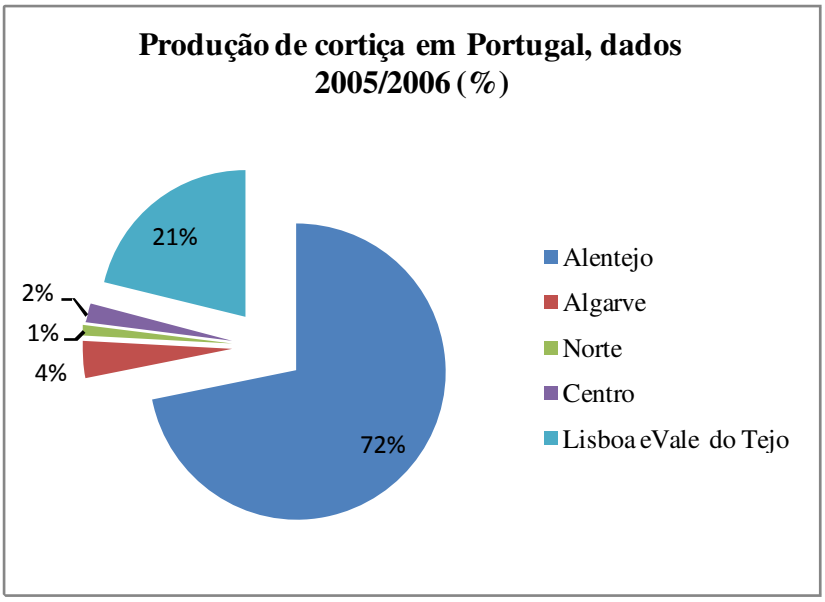


Figura 9- Distribuição de produção de cortiça em Portugal em percentagem [2, 18]

2.3. Importância para a Economia de Portugal

Há quem afirme que a cortiça é a embaixadora de Portugal. Sem duvida que Portugal é lider mundial na produçao de Cortiça, isso se verifica na tabela 2, em que a nossa produção é maioritaria em relação a todos os outros países. A cortiça é um dos principais contributos para as nossas exportações, mas dada a crise economica que se atravessa, as exportaçoes têm diminuido na quantidade como também nos lucros [11,19].

Estima-se que apenas 20% das empresas portuguesas opera exclusivamente no mercado nacional. A grande aposta das empresas é sem duvida no mercado externo, estando envolvidas essencialmente neste negocio cerca de 42% das empresas. As restantes continuam a apostar nos dois mercados [11,19].

Portugal também é lider mundial de importaçao de cortiça, transformando e exportando como produto final. Apenas 38% das empresas nacionais importam cortiça como matéria prima [11,19].

Na figura 10 é possivel confirmar o valor e a quantidade de exportações e importações em Portugal.

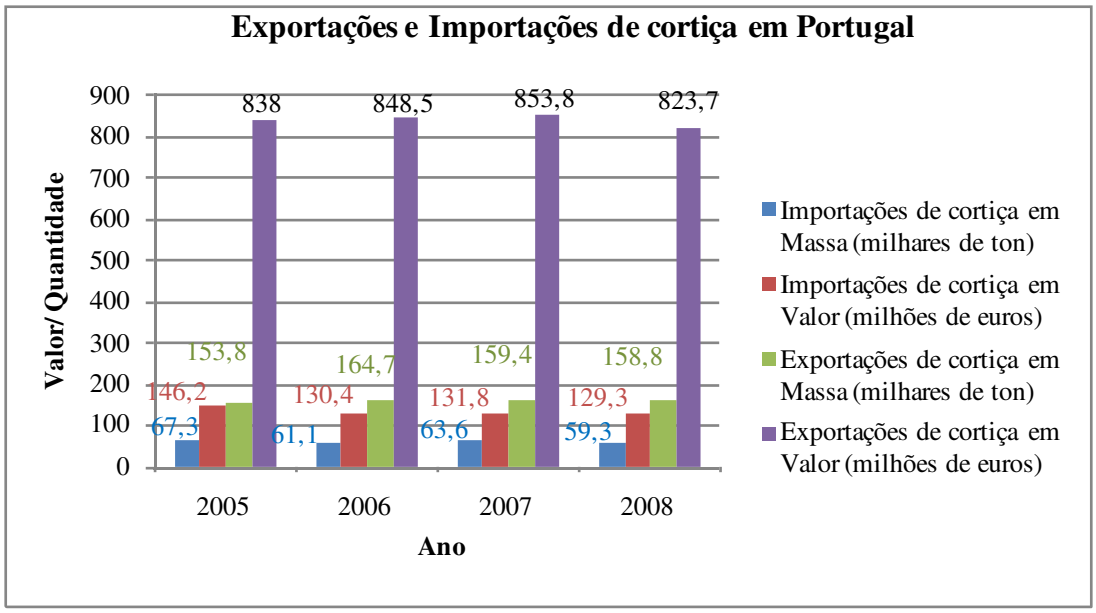


Figura 10- Valor e Quantidade de exportações e importações em Portugal [2]

Este facto dá que pensar, pois se somos os maiores exportadores de cortiça, então porque temos de importar? A resposta é simples, a cortiça importada vem como matéria-prima, enquanto quase na totalidade da cortiça exportada, esta vai já como produto final, rolhas ou então material de construção, como se pode verificar consultando a figura 11.

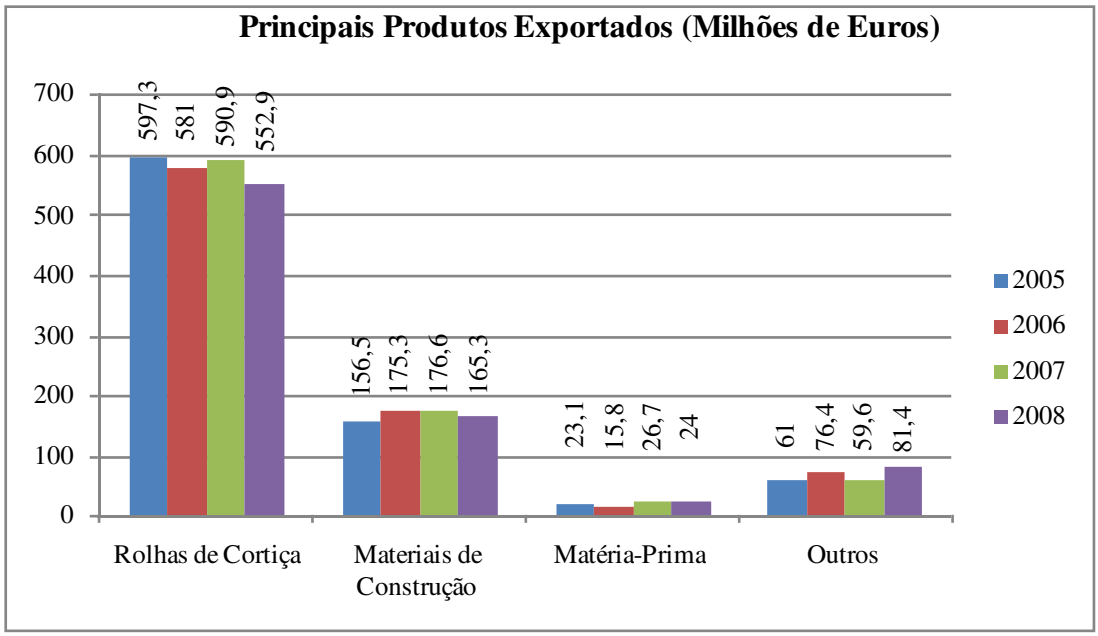


Figura 11- Valor dos principais produtos de cortiça exportados em Portugal [2]

Outro aspecto tambem muito importante está relacionado com a quantidade exportada ou importada e respectivo preço. Na figura 10, verifica-se que em 2005 exportaram-se 153,8 milhares de toneladas e em 2008 cerca de 158,8 milhares de tonelas, ou seja um ligeiro aumento na quantidade vendida. Mas em contrapartida, enquanto que em 2005 as exportaçoes renderam 838 milhoes de euros, em 2008 baixou para os 823,7 milhoes de euros. Ou seja, vendeu-se mais, e ganhou-se menos. Estudos realizados mostram a variaçao dos preços em diferentes etapas e produtos, como se pode ver na tabela 3seguinte [6]:

Por cada 15 Kg	**2005**	**2008**
Preço de venda da cortiça na arvore incluindo custos das extracçoes	30,51€	31,40€
Preço de venda da cortiça na pilha incluindo custos das extracçoes	36,02€	31€
Custo da extracçao da cortiça	4,23€	4€
Cortiça virgem	5,50€	6,50€
Cortiça queimada	0,50€	1,75€
Bocados	4,50€	4,50€

Tabela 3- Variação do preço da cortiça dependendo da forma como é entregue [6, 18]

Estes preços têm sofrido alterações um pouco significativas ao longo dos anos. O ano de 2005 foi uma excepção quanto ao preço de venda da cortiça na árvore, pois em 2004 o preço era 36,24€ e em 2006 de 33,13€ [6].

2.4. Características e propriedades macroscópicas da Cortiça

Macroscopicamente, a Cortiça tem as seguintes propriedades [2, 5,13, 14,16]:

- Um material de baixa densidade, leve (110 e 120 Kg/m3)
- Praticamente impermeável a líquidos e gases,
- Flexível, elástico, resiliente e compressível,
- Resistente à água e a diversos produtos químicos,
- Inócuo, acústico e isolante térmico,
- Resistente ao desgaste e ao atrito,
- Baixo coeficiente de Poisson, baixa condutividade térmica, (0.036 e 0.040 W/mk)
- Bom comportamento ao fogo, não libertando gases tóxicos,
- Grande estabilidade dimensional
- Grande capacidade de absorção de energia durante um impacto,
- Grande capacidade de dissipação de energia durante uma vibração,
- Reciclável, biodegradável e natural.

No anexo A encontra-se uma tabela com algumas das propriedades da cortiça [13] Já no anexo B é apresentada uma tabela com a comparação entre a cortiça e outros materiais, dando-se principal destaque ao poliuretano no anexo C.

2.5. Etapas da produção de Cortiça

2.5.1. Descortiçamento

O ciclo de vida da cortiça começa com a sua extracção do sobreiro, acção denominada descortiçamento. Esta operação é constituída por cinco etapas: abertura, separação, traçagem, extracção e por fim terá de descalçar [2,12].

A abertura consiste em dar um golpe na cortiça no sentido vertical, escolhendo as fendas mais profundas das ranhuras da casca [2].

Seguidamente, separa-se a prancha introduzindo-se o gume do machado entre a barriga da prancha e o entrecasco. A terceira etapa tem como objectivo delimitar o tamanho que se pretende retirar da prancha, [2,12].

Tal como o nome indica, na extracção retira-se a prancha e depois liberta-se o resto do tronco com aplicação das mesmas operações. Os cortes executados na sua extracção podem são efectuados tanto longitudinalmente como tangencialmente [2].

Por fim, poderão existir alguns fragmentos de cortiça junto ao tronco, e é necessário dar algumas pancadas com o olho do machado [2,12].

Depois destas etapas concluídas marca-se o ano em que se fez o descortiçamento e espera-se que passem nove anos para nova operação [2,12].

a) **b)** **c)**

Figura 12-Fases do descortiçamento, a) abrir; b) e c) separar [1]

2.5.2. Período de repouso

Durante este período dá-se a maturação da mateira prima e assim se estabiliza a cortiça. Depois de retirada do sobreiro é empilhada tanto no interior como no exterior de fábricas ou armazéns, podendo estar à chuva ou ao sol, tendo como restrição o contacto com a madeira, pois esta pode transmitir fungos para a cortiça [2,12].

2.5.3. Percurso Industrial

O primeiro passo na fábrica é colocar as pranchas em água limpa e a ferver de modo a dar-se a cozedura das mesmas. Este processo demora cerca de uma hora e tem como objectivos limpar a cortiça, extraindo as substâncias hidro-soluveis, aumentar a espessura reduzindo desta forma a sua densidade e por fim tornar a cortiça mais elástica e macia [2,3,12].

Seguidamente é necessário estabilizar a cortiça, que poderá demorar 3 semanas e aí procede-se à selecção das pranchas, que deverão aplanar nesse período de tempo de modo a obterem a consistência necessária para poderem ser transformadas [2,12].

Para o fabrico de rolhas natural, seguem-se dois processos representados na figura 13: a Rabaneação e a Brocagem. Na rabaneação pretende-se cortar as pranchas de modo a terem uma largura ligeiramente superior ao comprimento das rolhas. No processo a seguir, perfuram-se as tiras de cortiça com uma broca obtendo-se a rolha. Os desperdícios desta operação serão aproveitados para o granulado da cortiça. É nesta etapa que a empresa Sá Rosas se focaliza, transformando os desperdícios em granulados, que misturando com os aglomerantes formam os aglomerados, podendo-se produzir as chamadas rolhas técnicas [2]. Depois de se ter a rolha, é necessário rectifica-la, para as dimensões pretendidas [2].

Por fim, realiza-se uma selecção, na qual as rolhas são diferenciadas e separadas no caso de terem defeitos ou a qualidade pretendida não ser a desejada. Este processo pode ser feito por simples inspecção visual ou então óptico [2].

Para o acabamento das rolhas, dá-se uma lavagem nas rolhas com água oxigenada ou ácido parecético, tendo este processo como objectivo limpar e desinfectar as rolhas. De seguida, o teor de humidade é estabilizado [2].

a)

b)

Figura 13- a) Rabaneação; b) Brocagem [2]

Opcionalmente, as rolhas poderão ser colmatadas, isto é, pretende-se vedar melhor as rolhas, colocando mistura de pó de cortiça nos poros [2].

A marcação é uma operação que irá depender do comprador. Esta pode ser realizada a tinta ou a fogo [2].

Figura 14- Marcação [2]

Finalmente faz-se o transporte, onde as rolhas são transportadas em sacos com anidrido sulfúrico [2].

2.6. Aglomerados e Granulados de Cortiça

No processo de transformação da cortiça virgem surgem desperdícios durante o seu processamento [2,12].

Os granulados resultam de um aproveitamento industrial das aparas resultantes da actividade de produção de rolhas de cortiça natural ou outros refugos de cortiça. Estes materiais são classificados segundo as suas características granulométricas e a sua massa volúmica [2,12].

Do mesmo modo, existem também os triturados, que são fabricados através da simples trituração de aparas de cortiça cozida [2,12].

Os aglomerados são o segundo produto mais importante em termos financeiros na industria corticeira. Os primeiros materiais aglomerados foram produzidos por volta de 1920, onde a aglomeração ocorria com base no uso de produtos naturais de origem tanto animal como vegetal. Estes obtêm-se através do aproveitamento de desperdícios como o pó, das aparas, de rolhas ou outros objectos de cortiça com defeitos e outros restos, que são aproximadamente 80% do peso total inicial da cortiça. Os desperdícios são misturados com a cortiça, preferencialmente virgem, amadia ou de má qualidade. A produção deste produto tem como objectivo criar um produto com propriedades semelhantes à cortiça original mas com geometrias mais complexas. No mercado existem dois tipos de aglomerados: brancos (compostos), negros (puros). Existe ainda uma combinação destes dois, denominado Rubbercork [2,12,20].

Os aglomerados brancos resultam da trituração da cortiça virgem. Estes são constituídos por grânulos de cortiça unidos entre si por adesivos, ligantes ou aglutinantes. A cortiça granulada é aglutinada por substâncias como borracha asfalto, plástico, cimento, gesso, entre outras, mas nunca a própria cortiça [2,10,12,20,21].

Os aglomerados negros são provenientes dos desperdícios da cortiça, quando triturados e submetidos a altas temperaturas. O seu nome advém da sua cor que tal como o nome indica é negra. Neste produto, a sua aglutinação deve-se aos produtos que por degradação térmica da cortiça se unem dando origem ao aglomerado [2,10,12,20,21].

a)

b)

Figura 15- a) Aglomerado branco; b) Aglomerado negro [2]

O Rubbercork é um aglomerado composto com granulados de cortiça com a borracha (elemento aglutinante), sendo obtido com tecnologias de produção bastante diferentes. Desta mistura resulta um produto flexível, elástico e sólido, pois junta as propriedades da cortiça (resistência mecânica e estabilidade dimensional) com a boa resiliência da borracha [2,20,21].

2.7. Campos de aplicação

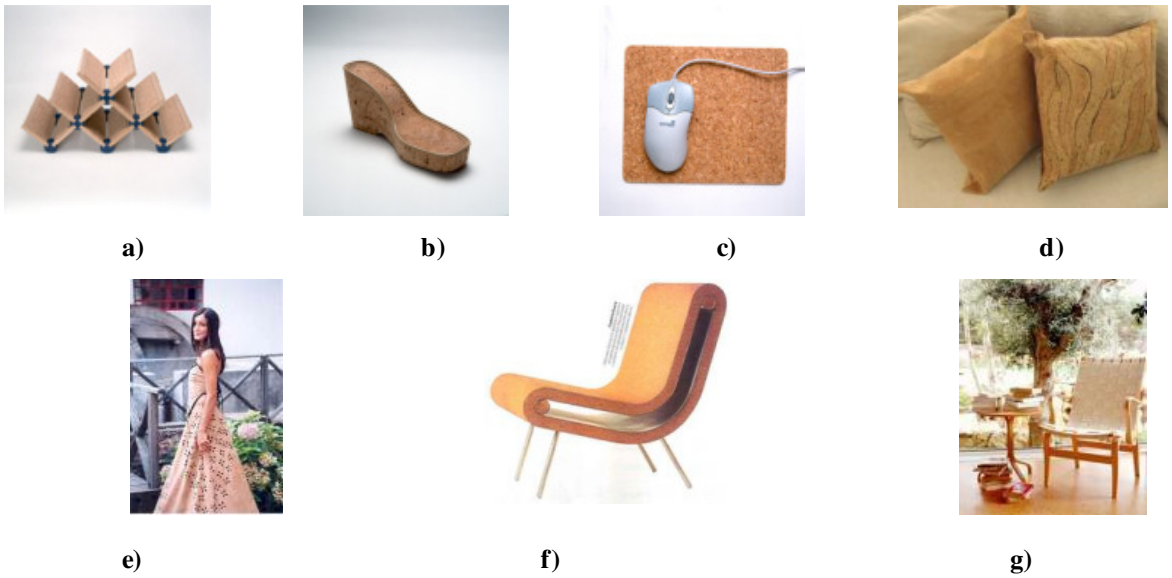
2.7.1. Da cortiça

Nos últimos anos, a cortiça tem sido alvo de um grande estudo de forma a ter as mais diversas aplicações. Pelos factos e provas adquiridas, estima-se que os primeiros utensílios feitos de cortiça datam mais de 5000 anos, usados para a pesca. Até aos nossos dias, momento em que definitivamente se desenvolveram estudos sobre este material há provas de que este material era usado nas seguintes aplicações [2,3,10,16,20,21]:

- Telhados de casas
- Sapatos de mulher
- Rolhas de cortiça

Neste momento, a cortiça tem sido utilizada numa vasta gama de produtos [2, 6, 13, 14]:

- Para vedação, como as rolhas de cortiça e discos para tampas de bebidas e de medicamentos
- Para artefactos como garrafeiras, bases, tapetes de rato, malas, sacos, Roupas em cortiça
- Sapatos e suas solas
- Artigos decorativos para casa ou escritório como almofadas e cadeiras
- Pavimentos e revestimentos
- Juntas de automóveis
- Recolha de óleo derramado
- Produtos para a indústria química, militar, aeronáutica e farmacêutica
- No isolamento térmico, acústico, de telhados, parede dupla, pavimentos, tectos falsos, etc…



a) **b)** **c)** **d)**

e) **f)** **g)**

Figura 16- Utensílios em cortiça, a) garrafeira; b) calçado; c) tapete de rato; d) almofadas; e) roupa; f) e g) cadeiras

Novos projectos estão a ser desenvolvidos, uns que brevemente serão lançados no mercado, outros encontram-se em fase de testes. Como exemplo, o projecto AEROCORK tem como objectivo utilizar materiais compósitos de cortiça para a construção de aviões civis ultraleves, substituindo assim materiais sintéticos, ajudando o ambiente e apostando em materiais naturais [22].

2.7.2. Dos aglomerados de cortiça

Os aglomerados de cortiça, neste momento, estão em crescente expansão em diversas aplicações, pois dadas as suas propriedades únicas, tornam estes materiais extremamente úteis.

Neste subcapítulo estão descritas as principais aplicações destes materiais [1, 12].

Aplicações dos Aglomerados Negros

- Aplicações como isolante térmico, acústico e vibratório
- Elemento decorativo
- Revestimento de pavimentos com sub-pavimentos em forma de folha

Aplicações dos Aglomerados Brancos

- Painéis de afixação
- Peças de calçado
- Impressoras informáticas
- Caixas e tabuleiros
- Capacetes de protecção
- Tapetes malas e pastas
- Tecido de vestuário e papel
- Bolas de hóquei, bolas de basebol entre outras
- Raquetes de ténis de mesa e tacos de golfe

Aplicações do Rubbercork

- Para indústrias automóveis, naval, espacial, aérea e eléctricas
- Juntas de máquinas, motores e transformadores
- Pavimentos com elevada intensidade de tráfego
- Juntas de expansão e anti-vibratórios
- Embraiagens e freios de servo sistemas
- Isolante para os transformadores e comutadores eléctricos

Outras gamas de produtos estão preparadas para serem lançados no mercado como [9]:

◊ Peças rígidas para divisórias amovíveis

◊ Painéis de portas e mobiliários

2.8. Produtos Constituídos Por Material Base a Cortiça

No mercado já existem diversos produtos constituídos não só por cortiça ou aglomerados. A criação de materiais resultantes da junção de várias matérias-primas tem por base o melhoramento das propriedades de determinado material para uma dada aplicação. Este é também um dos objectivos deste trabalho.

Para alguns revestimentos, criaram-se já alguns produtos com material base a cortiça, como [5]:

- Ladrilhos de aglomerados de cortiça com PVC;
- Ladrilhos de aglomerados de cortiça com elastómeros;
- Ladrilhos de aglomerados de cortiça;
- Revestimentos vinílicos sobre suporte resiliente de aglomerado de cortiça e de aglomerado de cortiça com PVC no tardoz;
- Revestimentos de rubbercork;
- Pavimentos flutuantes com cortiça na camada superior e/ou inferior.

São várias as empresas envolvidas neste tipo de investigações. Novas propostas estão a ser estudadas e desenvolvidas, como aplicações de:

- Cortiça com borracha
- Cortiça com fibra de coco
- Cortiça com TetraPak

Também institutos de investigação, como o Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, têm algumas patentes e tecnologias desenvolvidas, havendo conjuntamente um esforço dos designers na criação de peças de alto valor para a cortiça [23].

2.9. A Empresa

2.9.1. Produção do Aglomerado

A empresa Sá Rosas, contando com cerca de 11 funcionários na fábrica, faz parte de uma das maiores empresas de cortiça a nível nacional, a JA Veiga Macedo.

Situada na zona de maior concentração de fabricas de industria corticeira, a zona litoral norte do país, esta empresa dedica-se essencialmente na produção e evolução dos produtos aglomerados. Seguidamente será descrito o ciclo de produção dos aglomerados na empresa.

Tudo começa com o aproveitamento de restos provenientes do corte da cortiça para rolhas, fazendo-se o transporte dos mesmos para um depósito onde seguidamente serão triturados. Na figura

17 estão as aparas de cortiça resultantes do corte para rolhas e na figura 18 está representa a máquina de trituração.

Figura 17- Aparas de cortiça depois do corte para rolhas

a)

b)

Figura 18- Máquina de trituração, a) vista lateral; b) vista superior com destaque à trituração

No aferidor de apára partida, os pedaços de maiores dimensões terão de ir ao moinho para ficarem com as dimensões pretendidas, os restantes que cumprem os requisitos serão direccionados para a secagem. Serão realizadas as passagens necessárias até que os grânulos satisfaçam o pretendido, sendo um ciclo continuo entre o aferidor e o moinho. Na figura 19 estão representados o aferidor de broken (a) e o moinho (b).

a)

b)

Figura 19- a) aferidor de broken; b) moinho

Durante o período de secagem, de aproximadamente 20 minutos, o material encontra-se no túnel de secagem.

Figura 20- Vista exterior do secador ja na parte final de secagem

Já no andar de cima, depois de realizada a secagem, os granulados ainda de grandes dimensões, terão dois caminhos: ou vão directamente para um segundo moinho, ou então, se os grânulos tiverem propriedades diferentes, ou seja, para não haver mistura, estes são ensacados de modo a serem utilizados quando já não houver produto antigo. Na figura 21 são apresentados os passos na segunda moagem.

a)

b)

Figura 21- Segunda moagem; a) grânulos directamente encaminhados para o 2º moinho; b) 2º moinho, localizado na andar de baixo.

Terminada esta fase, chega a altura de dividir os grânulos em tamanho e massa volúmica.

Primeiramente, estes vão para o aferidor de granulados onde serão divididos quanto ao seu volume. Todos os grânulos, dada a pressão a que estão sujeitos na máquina, consoante o seu volume irão deslocar-se para as respectivas máquinas de modo a serem depois separadas consoante a sua densidade. Na figura 22 encontra-se o aferidor granulométrico.

Figura 22- Aferidor granulométrico

Depois desta etapa, os grânulos serão escolhidos quanto à sua massa volúmica.

Este processo é um pouco mais complexo, pois cada máquina, denominado aferidor de densidade, terá duas saídas, uma em que sairão os grânulos com as dimensões e massa volúmica pretendidas, e que ficam logo ensacados e prontos a usar, e a outra saída que conduz a uma outra máquina em que lhe corresponde essa mesma densidade. Se mesmo assim não se aproveitar, então serão reciclados novamente. De salientar que é necessário ir regulando estas máquinas de modo a que as massas volúmicas estejam de acordo com o pretendido, para isso existe uma régua reguladora ou de calibre. Na figura 23 estão representados os aferidores volumétricos.

a) **b)**

Figura 23- Aferidores volumétricos, a) colocação dos grânulos em sacos; b) regulador de densidade responsável pela separação dos grânulos

Depois de ensacados, serão colocados num deposito para depois serem transformados em aglomerados, com a devida mistura dos granulados com colas, borrachas, etc., dependendo do fim a que se destinam.

Seguidamente, após a obtenção dos aglomerados, estes serão crivados, de modo a que tudo o que passe no crivo seja aproveitado para o passo seguinte e o restante, com a formação de uma espécie de bolas, será queimado.

Figura 24- Transformação em aglomerados

Finalmente, depois de se colocarem estes aglomerados num outro deposito existente no meio das máquinas, ver figura 25, o material será pressionado a sair por uns tubos, formando-se os bastões que quando atingem determinado comprimento são cortados com o auxilio de um sistema bielo-manivela. Estes bastões são colocados, posteriormente, durante um certo tempo para estabilizarem, ver figura 25 b), para posteriormente serem preparadas para rolhas.

a) **b)**

Figura 25-a) Produção dos bastões; b) Depósito dos bastões

Finalmente, os bastões podem ser cortados nas máquinas de corte para rolhas, estas são rotuladas e colocadas em embalagem apropriada. A figura 26 mostra as máquinas para o corte dos bastões.

a) b)

Figura 26- Corte dos bastões

2.9.2. CorkFlex- Isolamento em cortiça

O tubo de cortiça CorkFlex é um produto natural, produzido em Portugal, na empresa Sá Rosas SA. Distingue-se pela sua aplicabilidade em isolamentos térmicos, tanto para temperaturas elevadas, como também baixas, isolamentos acústicos, em colectores, acumuladores de água, instalações de energia solar, ar condicionado, aquecimentos centrais e condutas de água quente e fria. Deste modo, evita perdas de energia calorífica e ruídos [24].

Quanto às suas propriedades, este produto apresenta-se com espessuras a variar entre os 10 a 20mm, com uma condutividade térmica de 0,040 W/m.K, tensão de ruptura entre os 428 e 733 KPa, massa volúmica entre os 243,7 e 225,6 daN e resistência até uma temperatura de 225°C. Segundo a norma ASTM G53, verifica-se a ausência de fenómenos de desagregação, fissuramento e deformação estrutural sob o efeito de raios ultravioleta [24].

2.10. Ensaios a nível energético

Qualquer material que entra no mercado, alem de ter uma designação, um formato, cor ou ate mesmo uma caracterização mecânica, torna-se indispensável obter outras propriedades, a nível eléctrico e térmico. Então, dependendo do campo de aplicação a que o material estará sujeito, torna-se indispensável saber algumas propriedades do material [25].

Como já foi referido, se o material estiver sujeito a grandes esforços, devem-se analisar as suas propriedades mecânicas, especialmente as quatro que foram referidas nos subcapítulos anteriores.

Para o caso dos campos de aplicação estarem relacionados com isolamentos, torna-se importante saber o valor da condutividade térmica, que para um melhor isolamento, o seu valor terá de ser o mais baixo possível.

Um bom isolante térmico tem de ter as seguintes propriedades [5,17]:

- Baixo coeficiente de condutividade térmica;
- Não absorção de humidade;
- Resistência ao fogo;
- Ausência de cheiro;
- Resistência mecânica dependendo da sua utilização;
- Maneável dependendo dos esforços a que se sujeita;
- Não ser atacado por roedores;
- Durabilidade;
- Baixa massa volúmica.

A condutividade térmica é dada pela fórmula:

$$k = \frac{q.d}{A.\Delta T}(W/m.K) \quad (1)$$

Onde:

k- Condutividade térmica ($\frac{W}{mK}$).

q- Taxa de transferência de calor

d- Espessura do material

A- Área da secção em que o fluxo de calor incide

ΔT- Variação de temperatura desde 0 ate L [25]

A capacidade de um corpo se opor à corrente eléctrica define-se por resistência eléctrica. Este parâmetro terá de ser o mais elevado possível, quando se pretende um bom isolamento à corrente eléctrica. a resistência R é dada por [25]:

$$R = \frac{U}{I} \quad (2)$$

Onde:

R- Resistência

U- Diferença de potencial

I- Intensidade da corrente eléctrica [25]

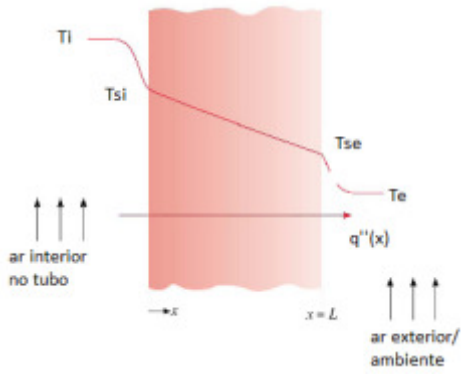


Figura 27- Distribuição de temperaturas durante transferência de calor em placas planas [25]

Para instalações de frio industrial, refrigeração e climatização, há problemas de isolamento térmico devido à condensação que ocorre. O objectivo nesta área é conseguir permanecer seca a superfície do isolamento, pois caso isso não aconteça, poderão ocorrer graves avarias. Relembrando, a condensação ocorre quando a água no estado gasoso passa para estado líquido e a temperatura de orvalho é a temperatura à qual se dá a condensação. Em instalações de ar condicionado, na parte sem isolamento haveria gelo (a), mas com uma ligeira espessura de isolamento já se formaria o orvalho caso a temperatura fosse menor que 0ºC (b). De 0ºC ate à temperatura de orvalho formar-se-iam gotas de orvalho (c). Por fim (d), quando a espessura for tal que a temperatura da superfície exterior do isolamento for superior à temperatura do orvalho, poder-se-á dizer que o isolamento cumpre o pretendido. No caos da figura seguinte, dá-se o exemplo de a temperatura na superfície exterior ser de 15ºC. Ou seja, o objectivo neste caso será obter um bom isolamento com a menor espessura possível, dependendo da condutividade térmica [26].

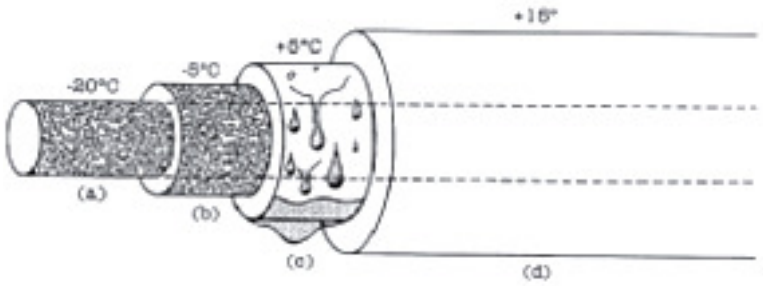


Figura 28- Relação da espessura com o fenómeno da condensação [26]

Para o cálculo da espessura de isolamento, em superfícies planas, necessária para que não ocorra a condensação, há vários parâmetros a ter em conta. Então pretende-se saber essa espessura e.
A densidade de fluxo de calor é dado por [26]:

$$q'' = \frac{\theta_e - \theta_i}{R} \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (3)$$

Onde:

q''- densidade de fluxo

θ_e - Temperatura ambiente a 0ºC

θ_i- Temperatura interior a 0ºC

R''- Resistência térmica por área, definida por [25]:

$$R'' = \frac{1}{h_i} + \frac{d}{k} + \frac{1}{h_e} \left(m^2.\frac{K}{W}\right) \quad (4)$$

Onde:

h_i- Coeficiente superficial de transmissão de calor interior ($\frac{Wm^2}{K}$)

h_e- Coeficiente superficial de transmissão de calor exterior

A partir daqui, relacionando estas expressões, tendo em conta o fluxo constante entre fronteiras, pode-se chegar às seguintes conclusões [26]:

$$q'' = \frac{\theta_e - \theta_i}{\frac{1}{h_i} + \frac{d}{k} + \frac{1}{h_e}} = \frac{\theta_e - \theta_{se}}{\frac{1}{h_e}} = \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{\frac{d}{k}} = \frac{\theta_{si} - \theta_i}{\frac{1}{h_i}} \quad (5)$$

Onde:

θ_{se}- Temperaturas de superfície exterior

θ_{si}- Temperaturas de superfície interior

θ_r- Temperaturas de superfície de orvalho

Definindo a temperatura superficial exterior igual à temperatura de orvalho e a temperatura interior igual à temperatura superficial interior, é possível chegar às seguintes equações:

$$q'' = \frac{\theta_e - \theta_r}{\frac{1}{h_e}} = \frac{\theta_r - \theta_i}{\frac{d}{k}} \quad (6)$$

Levando finalmente a [16]:

$$d = \frac{k}{h_e} . \frac{\theta_r - \theta_i}{\theta_e - \theta_r} \quad (7)$$

3. Procedimento Experimental, Material e Equipamento

3.1. Produção dos tubos na empresa

3.1.1. Produção do Aglomerado

Como já foi descrito no capítulo anterior, a transformação de cortiça extraída do sobreiro para aglomerante passa por inúmeras e complexas fases. Mas, para que seja possível obter o aglomerado pretendido, é necessário respeitar algumas normas de modo a definir o tamanho de grão que se pretende. No anexo E estão exemplificadas as principais normas para a produção de granulados e aglomerados.

3.1.2. Realização dos provetes

Para a realização de testes, tudo começa na empresa Sá Rosas SA, onde são produzidos os tubos para análise. Com a composição do produto definida, que é uma junção do granulado com o aglomerante nas devidas proporções, daqui resulta o aglomerado, cuja transformação se realiza no aglomerador. Inicialmente, os provetes a analisar continham os seguintes tamanhos de grão: 2 a 4 mm (2-4 mm), 1 a 2 mm (1-2 mm), 0,2 a 2 mm (0,2-2 mm), 0,2 a 1 mm (0,2-1 mm) e finalmente 2 a 6 mm (2-6 mm). No anexo D, encontram-se as designações dadas aos provetes como também as suas respectivas densidades.

O aglomerado é colocado em depósitos fixos a uma maquina, onde vai entrando em tubagens por resistências eléctricas que aquecem o aglomerado, compactando este. O funcionamento da máquina consiste num sistema bielo-manivela, que transmite movimento a cilindros cujo diâmetro exterior é inferior ao diâmetro interior das tubagens, onde estão montadas as resistências eléctricas, portanto, conforme esses cilindros interiores se movem, o aglomerante irá passar do depósito para os cilindros exteriores ocos, dando-se o aquecimento e respectiva compactação, produzindo-se os tubos que servirão como provetes na nossa análise.

Após esta etapa segue-se o seu peso, volume e respectiva massa volúmica.

3.1.3. Aglomerante

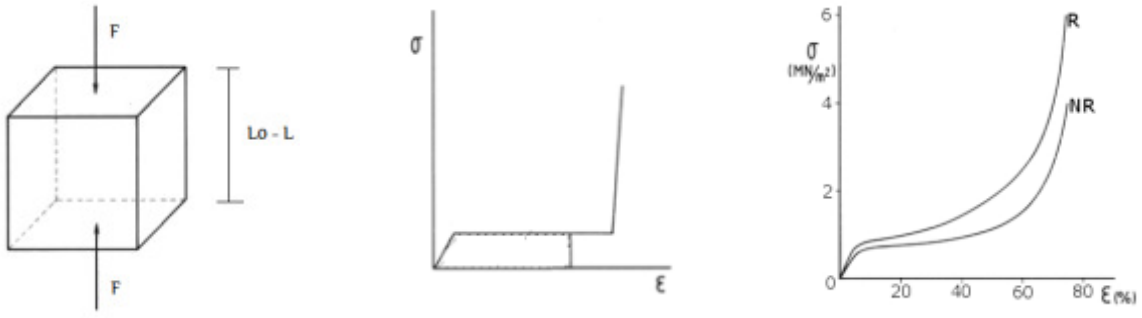
O aglomerante utilizado para a produção do aglomerado uma resina de base de poliuretano sem solventes e com alto teor de sólidos.

3.2. Ensaio de compressão nos laboratórios do DEM

3.2.1. Descrição do ensaio

Este ensaio tem como objectivo avaliar o comportamento do material quando sujeito uma carga de compressão. Dos valores obtidos, deverá ser possível obter curvas tensão-extensão nominal e verdadeira do material, como também curva carga-deslocamento e até mesmo a sua tenacidade [13].
Os ensaios de compressão uniaxial da cortiça permitem a determinação de inúmeras propriedades, a nivel elástico, como também a nivel plástico, fase em que ocorrem grandes deformações. A anisotropia da cortiça obriga a uma análise nas três direcções principais [13,28].

Na figura 29 encontram-se descritas as variações da tensão aplicada (quociente entre a força F e a area da face onde é aplicada a mesma) em relação à extensao relativa ε. Esta grandeza mede a deformação sofrida pelo material quando aplicada uma força, sendo ε obtido pelo quociente ΔL/Lo (encurtamento sobre o comprimento inicial) [13,28].



a) **b)** **c)**

Figura 29- Ensaio de compressão uniaxial, a) aplicação de carga; b) idealização das curvas de compressão; c) curvas tensão-extensao em compressão radial (R) e não radial (NR) [13]

Os materiais celulares têm curvas de compressão semelhantes à figura 29 c, e no caso da cortiça as curvas têm o aspecto da figura 29 b. O seu comportamento em compressao depende não só da temperatura a que se efectua, mas tambem da velocidade, dado a cortiça ser um material viscoelastico, quanto mais rapida for a compressao, maior será a tensao para um determinado ε [6, 7].
Verifica-se que para uma mesma extensão ε, a tensao σ é maior na direcçao radial (curva R) que na direcçao axial (curva NR), ou seja, a resistencia do material é maior na direcção radial. A direcçao tangencial apresenta um comportamento semelhante à axial, por isso no grafico da figura 29 c, esta curva estar representada por NR (não radial) [13,14].

Pela figura 29 c), identificam-se três regiões na curva de compressão. A primeira, onde os valores de tensao e extensao ainda são pequenos, mas tendo a curva um elevado declive, ou seja, um elevado modulo de Young, este zona corresponde à deformação elástica, mais precisamente viscoelástica no caso da cortiça. O que significa que ao retirar-se a força aplicada, o material volta à sua forma inicial, não sofrendo qualquer tipo de deformação. Seguidamente o material sofre um novo tipo de deformação, em que ocorre o colapso das células. Por fim, ocorre o esmagamento, pois as paredes celulares começam a ser comprimidas umas contra as outras, tendo como resultado um aumento drastico da tensão com um insignificante aumento da extensão,[13].

3.2.2. Condições de ensaio

O ensaio foi realizado numa máquina Instron 5566. A carga máxima à qual os provetes estão sujeitos é 9800 N.

Segundo a norma ASTM C365, os provetes com secção circular devem ter uma área de contacto inferior a 400 mm2. Como o comprimento para a realização do ensaio fica ao encargo de quem o realiza, optou-se por um comprimento inicial de 60mm. A velocidade de compressão segundo a norma deveria ser cerca de 0,5 mm/min, e neste trabalho serão avaliadas varias velocidades para se descrever o comportamento do material, respectivamente 0,6, 1,5 e 5 mm/min, de modo não só a descrever as características do material, como também comparar os resultados para as várias velocidades. De referir que a tensão de cedência obtém-se segundo uma recta paralela com a mesma inclinação à curva tensão-extensão do material na zona elástica, mas começando num ponto de tensão nula e extensão de 2%. Dado que mesmo na zona elástica existe alguma concavidade, opta-se por criar uma recta entre os pontos de extensão 1 e 2%, obtendo-se o declive [14].

Figura 30- Equipamento utilizado para o ensaio de compressão

Ensaio de flexão a 3 pontos

3.2.3. Descrição do ensaio

Pretende-se num ensaio de flexão determinar a tensão, módulo de ruptura (valor máximo de tracção e compressão nas fibras externas do provete), o módulo de elasticidade de flexão, entre outras propriedades mecânicas.

O modo de realização deste ensaio consiste em colocar o provete apoiado nas suas extremidades e depois depende do tipo de ensaio que se pretende fazer, denominando-se flexão a 3 pontos ou flexão a 4 pontos [27,28].

O cálculo do modulo de ruptura obtém-se por:

$$M_r = \frac{M.y}{I_m} \quad (8)$$

Onde:

M_r - Tensão de ruptura

M - Momento máximo de flexão

y- Distância do eixo à fibra externa

I_m - Momento de inércia inicial da secção transversal para provetes de secção circular

Sendo então este ultimo dado por [27,28]:

$$I = \frac{D_{ext}^4 - D_{int}^4}{64} \quad (9)$$

Onde:

D_{ext}- Diâmetro exterior da secção circular

D_{int}- Diâmetro interior da secção circular

3.2.4. Condições de ensaio

O ensaio foi realizado nas máquinas Instron 5566 e Instron 3369.

Para a determinação das propriedades mecânicas a nível da flexão, foram necessários calcular vários parâmetros iniciais, como a velocidade de deformação e o comprimento dos provetes. Segundo a norma ASTM C790, as distancias que se têm de cumprir estão especificadas na figura 31.

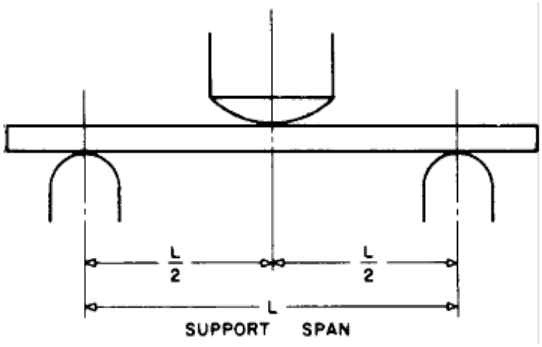


Figura 31- Distâncias entre apoios e carga de aplicação

A distância entre apoios directamente relacionado com a espessura do provete, 16:1, ou seja, dado que o provete tem uma forma cilíndrica oca, sendo a sua espessura 10mm, concluiu-se que a espessura para o ensaio seria 20mm, dando um comprimento L entre apoios de 320mm. Sendo assim, com a adição de 50mm de cada lado, o provete teria 420mm de comprimento.

A velocidade a que decorre o ensaio é calculada da seguinte forma:

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (10)$$

Onde:

R é a velocidade de deformação (mm/min)

Z uma constante igual a 0,01, pois este material, dada a grande deflexão que sofre, cumpre os requisitos para se seguir o procedimento B da norma

L a distância entre apoios (mm)

d a espessura com o dobro da dimensão da espessura da parede (mm)

Então o ensaio ocorrerá a uma velocidade de 8,5 mm/min para tubos de espessura de 10mm e 17mm/min para tubos com espessura de 20mm.

Para a determinação da força e tensão máximas, é preciso ter em conta o fenómeno que ocorre primeiro, durante a evolução da curva tensão-extensão. Se a tensão a 5% de deformação ocorrer antes do ponto máximo de tensão na curva tensão-extensão, será o valor da primeira a ter em conta, caso contrário, será a segunda opção.

Do mesmo modo, na flexão do material 2-6mm, a velocidade será 17mm/min, pois a parede do tubo tem 20mm de espessura. O comprimento do provete será de 740mm.

Figura 32-Equipamento e provete para ensaio de flexão em 3 pontos

3.3. Ensaio de tracção

De todos os ensaios, este é dos mais importantes para a análise à resistência do material. Pretende-se que o material seja submetido a esforços longitudinais ou transversais de modo a alongar-se até à ruptura [28].

3.3.1. Descrição do ensaio

Na maioria dos casos, só se tem em consideração ensaios de tracção uniaxial, como representado na figura 33, ou seja, a força é aplicada numa só direcção. A aplicação desta força, denominada força axial, sobre o material produzirá uma deformação no mesmo, aumentando o seu comprimento, denominado alongamento e consequentemente uma diminuição na secção transversal, [14,28].

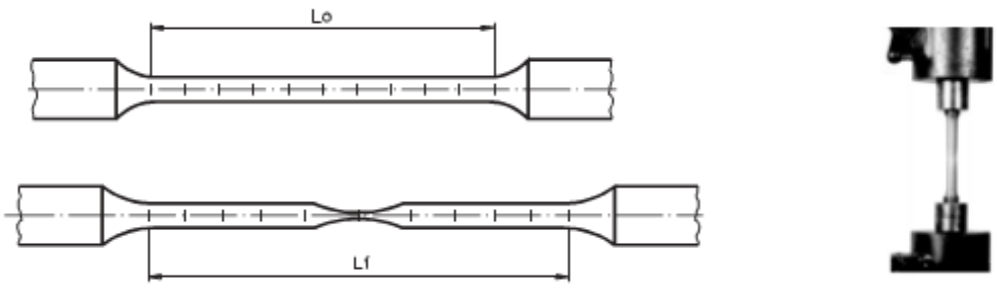
$$A_l = \frac{L_f - Lo}{Lo} \tag{11}$$

Onde:

A_l- Alongamento

L_f- Comprimento final

L_0- Comprimento inicial



a) **b)**

Figura 33- Ensaio de tracção, a) alongamento do provete, b) fixação do provete [14]

Na figura 34 encontram-se representadas as curvas de tracção da cortiça, num ensaio realizado até à ruptura do material. A curva representada por NR (não radial), representa as curvas que correspondem à tangencial e axial, embora se verifique que na direcção tangencial a resistência é ligeiramente superior. Deste ensaio, verificou-se que os provetes sofrem ruptura para tensões de tracção próximas de 0,8MPa com extensão de 7%. Já na direcção radial, até cerca de 1% a curva aumenta continuamente, mas a partir dai encontra-se uma zona denominada de serrilhado, ou seja, ocorrem flutuações de carga. As causas são ainda desconhecidas, mas indica que seja instabilidade na deformação. Daqui se conclui que este ensaio de tracção não é claro e decisivo para analisar as propriedades da cortiça, e os valores obtidos são sempre aproximados [14].

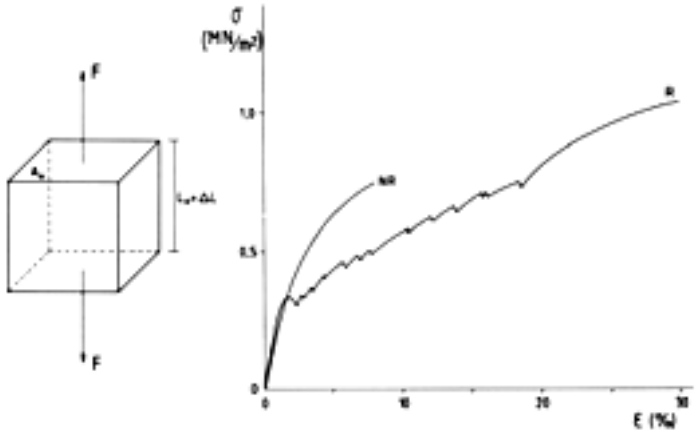


Figura 34- Curvas tensão-extensão no ensaio de tracçao nao radial e radial [14]

3.3.2. Condições do ensaio

Este ensaio tem como referência as dimensões referidas na norma ASTM C363. Os valores obtidos serão referentes a uma velocidade de ensaio de 1mm/min, com provetes de dimensões 120 mm de comprimento e largura a condizer com a espessura e diâmetro exterior dos provetes. Os apoios, de alumínio, nos quais se colaram os provetes para posteriormente serem fixos nas amarras da máquina electromecânica foram produzidos em tornos cujas dimensões encontram-se no anexo G. Na figura 35 encontra-se representado o provete e a máquina onde foi realizado o ensaio.

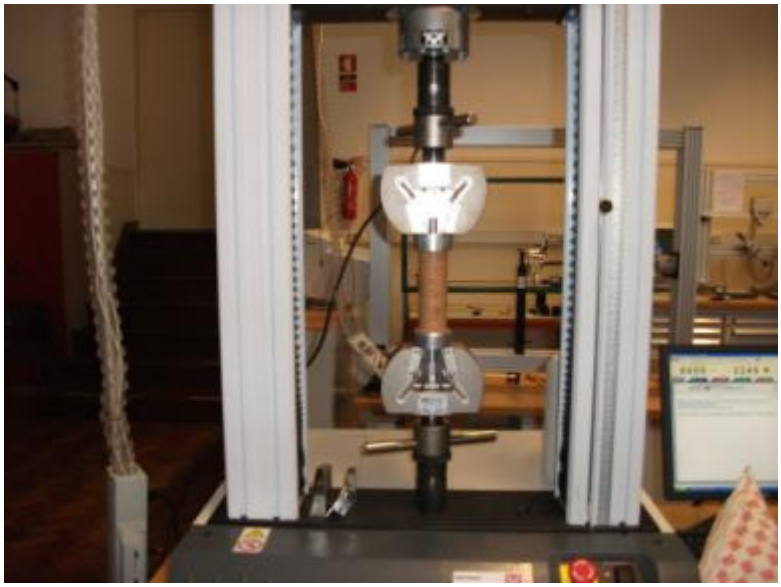


Figura 35- Equipamento e provete para ensaio de tracção

3.4. Ensaio de torção

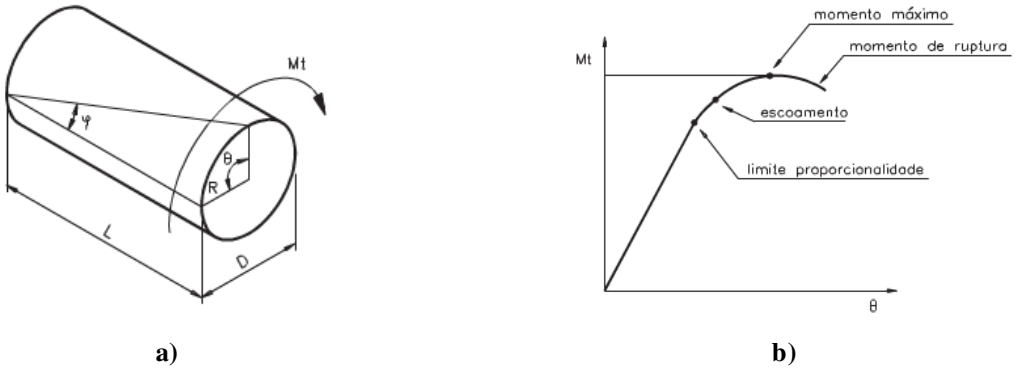
Enquanto num ensaio de compressão ou de tracção, o material está sujeito a esforços longitudinais ou transversais, num ensaio de torção esse esforço é aplicado no sentido de rotação. Ou seja, durante esta aplicação de esforços, parte do material encontra-se traccionado e outra parte comprimida. Existe assim uma deformação angular. Neste subcapítulo estão indicados os conceitos básicos deste ensaio, como também o procedimento que se seguiu para a obtenção de resultados. Pretende-se, deste modo, determinar-se a capacidade do material se distorcer segundo o binário que actua sobre o provete.

3.4.1. Descrição do ensaio

Quanto ao comportamento do material, verifica-se que até um determinado ângulo θ, o momento torsor, ou binário, M_t, aumenta proporcionalmente, ate um ponto que se denomina limite de proporcionalidade. A partir dai, continuando a aumentar o ângulo, verifica-se que o momento torsor continuará a aumentar mas com mais atenuação, ate que se atinge um momento máximo. Depois desta fase, o momento torsor diminuirá ate um ângulo θ máximo em que se dará a ruptura do material. Na figura 36 encontra-se exemplificado a variação da forma do material, tal como a curva descritiva deste ensaio [14]. Deste modo, definem-se dois parâmetros, o momento torsor, M_t, e a distorção, γ, em que os seus máximos são determinados com as seguintes expressões no caso de cilindros [14]:

$$\tau_{max} = \frac{16 M_t}{\pi D^3} \tag{12}$$

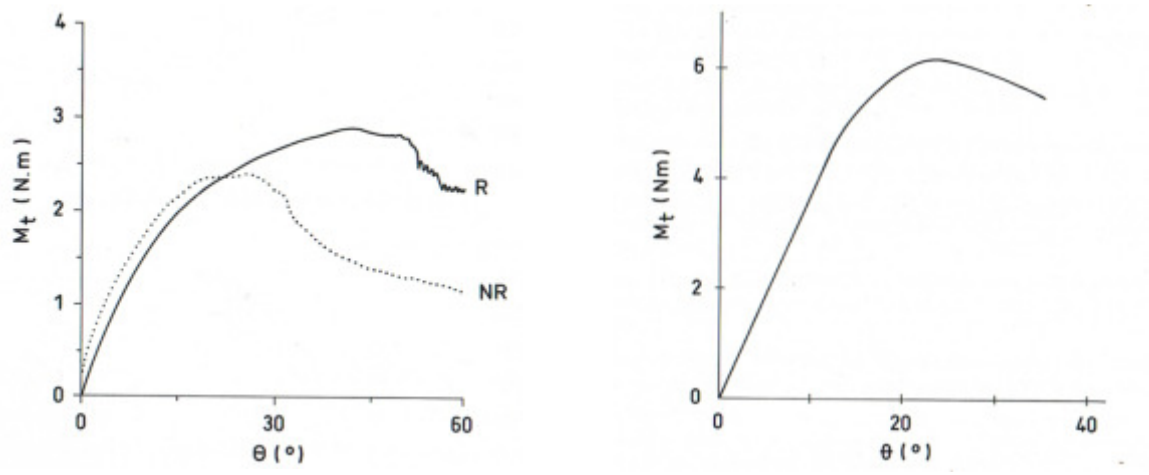
$$\gamma_{max} = \frac{D\theta}{2L} \tag{13}$$



a) **b)**

Figura 36- Efeito da aplicação de um momento torsor, a) no cilindro; b) relação momento torsor e ângulo de torção

Quanto à cortiça, a curva que relaciona o momento torsor e o ângulo θ tem uma configuração semelhante, onde também se verifica que o momento torsor é ligeiramente superior na direcção não radial até este atingir o seu máximo para determinado ângulo, sendo que nesse ponto o momento torsor na direcção radial continue a aumentar. Na figura 37 encontra-se descrita a evolução do momento torsor em função do ângulo de torção para rolhas de cortiça natural segundo o eixo radial e não radial a), e de rolhas de aglomerado de cortiça b), [14].



a) **b)**

Figura 37- Ensaio de torção com momento torsor em função do ângulo de torção, a) rolhas de cortiça natural segundo o eixo radial (R) e não radial (NR); b) rolhas de aglomerado de cortiça [14]

3.4.2. Condições de ensaio

. Foram consultadas normas relativas a este tipo de ensaio, mas nenhuma se aplica aos tipos de provetes que seriam ensaiados. O comprimento dos provetes é o mesmo que no ensaio de tracção, recorrendo-se também aos mesmos apoios. A máquina utilizada foi a INSTRON 8874, uma máquina biaxial, onde o actuador tem 2 graus de liberdade, deslocamento vertical e rotação, realizando-se assim o ensaio de torção. O ensaio demorou cerca de 20 segundos.

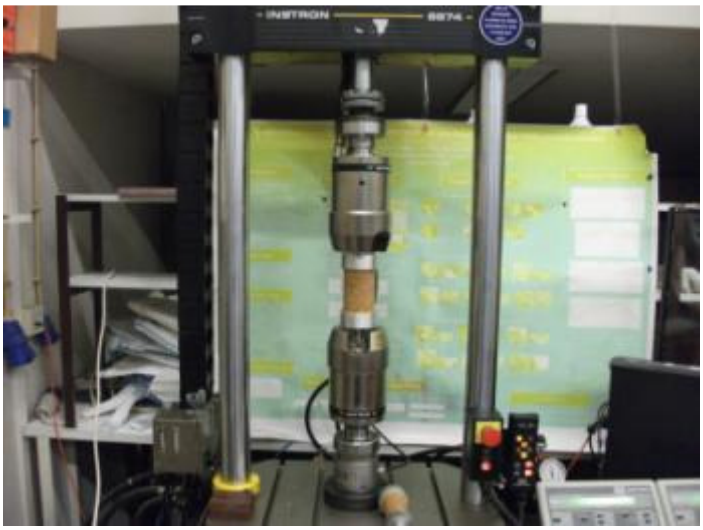


Figura 38- Máquina, provete e apoios na realização do ensaio de torção

3.5. Ensaio de Teor de Humidade

Este ensaio tem por finalidade determinar a quantidade de água que o material pode absorver, assim como a quantidade que ficará depois da secagem. Segundo a norma ASTM C272, a percentagem de água absorvida pelo provete é determinada ao fim de 24 horas de imersão. Para este estudo foram utilizados provetes de dimensões diferentes, determinando-se a sua densidade média depois de se retirarem os seus respectivos pesos e volume.

Dois estudos foram efectuados, com as seguintes condições: a temperatura da água a 23 ºC e a temperatura no forno de 50 ºC. O primeiro método consistia na imersão dos provetes na água durante duas horas, seguindo-se a colocação dos mesmos no forno com a mesma duração. Este procedimento foi repetido durante 12 horas, medindo-se o peso e volume, de modo a determinar a percentagem de água que os provetes absorviam durante a imersão e que perdiam durante a secagem. Depois deste ciclo de imersão e secagem, os provetes foram colocados à temperatura ambiente durante 12 horas, para posteriormente serem analisados à compressão e à flexão. O segundo método envolveu a determinação da percentagem de água ao fim de 24 horas. Foi analisada a cada duas horas, durante um período de 12 horas consecutivas, a percentagem de água que os provetes absorviam, e finalmente a determinação final da percentagem de água ao fim de 24 horas. Seguidamente, os provetes foram submetidos a uma secagem durante 24 horas no forno e à mesma temperatura que o método anterior, 50 °C. Estes ensaios, não só têm por objectivo a determinação do teor de água que estes conseguem absorver, como também avaliar o seu comportamento mecânico a nível da compressão e flexão.

3.6. Ensaio de Condutividade Térmica

Para a determinação da condutividade térmica, foram realizados dois tipos de testes completamente diferentes. Um dos procedimentos não sendo muito rigoroso permite que os valores obtidos sirvam como termo de comparação entre os materiais A descrição deste processo encontra-se no anexo F.

3.6.1. Determinação da condutividade térmica nos laboratórios do DEM

Já sobre o segundo processo, o ensaio consistiu na colocação de duas resistências de forma cilíndrica, com diâmetro de 10 mm e comprimento de 150 mm, estando colocados dentro do tubo de cortiça a analisar. Para se efectuar o isolamento nas extremidades do tubo, colocaram-se duas rolhas com furos, de modo a que as resistências fiquem fixas nos mesmos e os fios possam passar. Os valores das diferentes temperaturas (interior do tubo, exterior do tubo e temperatura ambiente) são registados num computador por meio de um aparelho denominado Omega OM-DAQPRO-5300. Com a variação da voltagem, (20V, 22V e 25V) determinaram-se as temperaturas na superfície interior e exterior do tubo nos 3 casos, calculando-se a condutividade térmica. Foram analisados os materiais com tamanhos de grão de 2- 6mm, 2-4 mm e 1-2 mm.

a) **b)**

Figura 39- a) e b) Aparelhos e modo de funcionamento do processo para determinação da condutividade térmica

3.6.2. Determinação da condutividade térmica no ISQ

A determinação da transferência de calor em tubos circulares realizada nos laboratórios do ISQ, segue a norma ISSO 8497:1994. O equipamento para a realização do ensaio, tal como está indicado na norma, consiste numa câmara termoestática para controlar a temperatura ambiente e um

sistema de controlo e medida das temperaturas e potência, mais propriamente um sistema de aquisição de dados, fonte de alimentação e termopares tipo K. O "pipe" tem um diâmetro de 19,53 mm, havendo uma bolsa de ar entre este e o material.

3.7. Ensaios de determinação da resistência ao calor

O método de ensaio consiste na exposição dos provetes a temperaturas pré-definidas, que neste caso foram as seguintes: temperatura ambiente, 150ºC, 175ºC, 200ºC, 225ºC, 250ºC, 275ºC e 300ºC. A duração do ensaio em cada patamar de temperatura foi de cerca de 15 minutos, tendo por finalidade proceder-se à inspecção das características visuais dos provetes e à determinação da sua massa volúmica. De salientar que os provetes foram submetidos a um choque térmico inicial, sendo então necessário ensaiar um provete novo em cada patamar, pré-condicionados à temperatura ambiente, neste caso 22 ºC. Estes ensaios foram realizados no Centro Tecnológico da Cortiça. O material analisado foi o de tamanho de grão 1-2 mm.

3.8. Ensaios de Envelhecimento Acelerado

Ensaio realizado no Centro Tecnológico da Cortiça, tendo por base o cumprimento da norma ASTM G53. Os provetes são expostos á acção combinada da radiação ultravioleta UVA (340 nm), temperatura e condensado de vapor de água, durante 720 horas (30 dias), nas seguintes condições: ciclos de 4 horas, sob radiação UVA a 60ºC, seguidas de 8 horas de condensação a 50ºC.

3.9. Ensaios com Materiais Sujeitos a Altas Temperaturas

Estes ensaios têm por objectivo analisar as diferenças nas propriedades dos materiais em ambientes com temperaturas mais elevadas. Isto é, depois da realização dos ensaios de condutividade térmica, foi possível detectar visualmente diferenças de cor na superfície dos tubos de isolamento de tamanho de grão 2-4mm e 1-2mm, tal como se pode verificar na figura 40.

Na tabela 4 apresentam-se as temperaturas exteriores a que os tubos estiveram sujeitos, tal como o período de tempo.

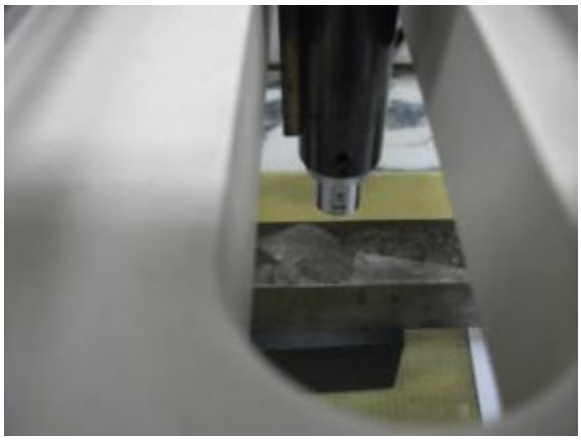
Período de tempo ao qual o material esteve submetido a determinada temperatura		
Temperatura	Grão 2-4mm	Grão 1-2mm
60 °C	70 min	15 min
100 °C	70 min	90 min
150 °C	90 min	35 min

Tabela 4- Período de tempo de aquecimento

Figura 40- Marcas de queimaduras nos tubos de cortiça devido às altas temperaturas

3.10. Análise microscópica dos materiais

a)



b)

Figura 41- a) aparelho microscópico; b) local onde se coloca o material para análise

Este procedimento consiste na visualização da estrutura celular dos provetes depois de estes serem submetidos a diferentes ensaios a nível mecânico. O microscópio óptico, representado na figura 41, transmite para um ecrã as imagens da superfície analisada. É possível este se movimentar segundo as 3 direcções, de modo a melhor focar a zona que se pretende analisar.

4. Resultados e Discussão

4.1. Ensaios de teor de humidade

Estes ensaios têm como objectivo analisar a capacidade dos provetes em absorver água em diferentes condições, analisando-se a diferença de volume, peso e aspecto visual. Mais à frente, nos ensaios de compressão e flexão, será possível analisar as propriedades mecânicas do material quando sujeito a este tipo de condições.

Os provetes sujeitos a condições de ensaios de 2 horas na água, seguido de 2 horas no forno, repetindo-se estes ciclo 3 vezes terão designação começando pela letra A seguido de um número que dependerá do tipo de grão. Já no caso de o ensaio consistir em 24 horas na água, seguido de 24 horas no forno, os provetes terão como designação a letra B seguido de um número para diferenciar o tipo de grão que constitui o provete.

Nas tabelas 5, 6 e 7 encontram-se as dimensões iniciais dos provetes, o seu peso antes e após os ensaios como também a variação do peso em função do tempo ocorrido durante a realização o mesmo.

4.1.1. Determinação da densidade e variação de volume

Tipo	Grão (mm)	Espessura (mm)		Dext (mm)	Dint (mm)	L (mm)	Peso (g)
A1	2-4	10		45	25	200	47,3
A2	2-4	10		45	25	196	46,5
A3	1-2	10		45	25	203	76,2
A4	1-2	10		45	25	202	75,8
A5	2-6	20		65	25	200	146,5
A6	2-6	20		65	25	200	138,8
A7	2-4	10		45	25	401	93
A8	1-2	10		45	25	406	147
B1	2-4	10		45	25	198	46,3
B2	2-4	10		45	25	195	46,6
B3	1-2	10		45	25	200	72,3
B4	1-2	10		45	25	187	67,4
B5	2-6	20		65	25	198	139,5
B6	2-6	20		65	25	197	137,4
B7	2-4	10		45	25	420	98,2
B8	1-2	10		45	25	420	151,8
B9	2-6	20		65	25	735	526,6

Tabela 5- Condições iniciais para os ensaios de humidade

Ensaio com ciclo de 2 horas na água e 2 horas no forno						
	2-4 mm		1-2 mm		2-6 mm	
Tempo	Densidade (kg/m^3)	% Peso/2h	Densidade (kg/m^3)	% Peso/2h	Densidade (kg/m^3)	% Peso/2h
Antes do ensaio	213,92	0	337,31	0	252,26	0
2 Horas na água	253,48	20,02	375,76	12,91	269,26	7,01
2 Horas no forno	233,44	-7,98	358,79	-4,56	260,53	-3,24
2 Horas na água	272,70	17,45	385,87	7,73	278,88	7,04
2 Horas no forno	250,84	-8,25	366,98	-4,96	264,24	-4,78
2 Horas na água	290,20	15,57	394,26	7,46	281,80	6,64
2 Horas no forno	263,37	-9,23	373,31	-5,56	268,01	-4,89
12 Horas à T Amb.	253,42	-3,65	367,96	-1,52	264,85	-1,18

Tabela 6- Valores da densidade e percentagem em peso durante o ciclo de 2 horas de imersão e 2 horas de secagem

Ensaio com ciclo de 24 horas na água e 24 horas no forno						
	2-4 mm		1-2 mm		2-6 mm	
Tempo	Densidade (kg/m^3)	% Peso	Densidade (kg/m^3)	% Peso	Densidade (kg/m^3)	% Peso
Antes do ensaio	213,40	0	328,42	0	249,75	0
2 Horas	261,42	23,99	372,95	15,27	267,53	6,48
4 Horas	263,22	25,25	373,56	15,99	268,58	6,78
6 Horas	269,76	28,02	377,27	17,22	268,50	6,72
8 Horas	272,69	29,60	382,12	18,80	270,66	7,62
10 Horas	279,64	32,79	386,90	20,27	272,29	8,26
12 Horas	278,46	32,58	386,32	20,24	271,72	7,96
24 Horas	287,05	**36,46**	393,28	**22,68**	274,87	**8,81**
24 Horas no forno	214,45	0,49	327,29	-0,35	247,41	-0,94

Tabela 7- Valores da densidade e percentagem em peso durante o ensaio de 24 horas de imersão e 24 horas de secagem

4.1.2. Discussão dos resultados

O cálculo da percentagem de peso nos provetes que são submetidos a um ciclo de 2 horas na água e 2 horas no forno, repetindo-se este procedimento 3 vezes, teve por base o valor do peso do provete no momento em que se finalizou o ensaio e o valor obtido 2 horas antes. Deste modo foi possível verificar a variação de peso que ocorre para cada material. Dos três tipos de grão analisados (2-4 mm, 1-2 mm e 2-6 mm), verifica-se que o grão 2-4 mm é o que tem maior capacidade de absorção de água, como também de perda da mesma. Curiosamente, o grão 2-6mm, tendo o maior volume, pois a sua espessura é o dobro em relação a qualquer um dos outros provetes, é o que apresenta uma menor capacidade de absorção, pois ao fim de 2 horas, o seu peso aumentou cerca de 7%, enquanto nos outros 2 materiais, 2-4 mm e 1-2mm, a variação de peso ronda os 20% e 13%, respectivamente. O mesmo acontece quando se realiza o segundo ensaio, com os provetes a serem submetidos a 24 horas na água (cumprindo a norma ASTM C272), onde se determinou que a percentagem de peso no fim do ensaio é de cerca de 8,81%, valor muito baixo comparativamente aos outros dois provetes. Já depois de estarem 24 horas no forno, verifica-se que só o grão 2-4 mm tem uma densidade maior que a inicial. Todos os outros acabam por perder toda a humidade a que estiveram sujeitos e ainda perderam parte da humidade inicial que continham quando produzidos. Isto significa, que quando sujeitos a temperaturas de 50 ºC, sofrem transformação da sua constituição inicial, embora visualmente, não se tenha verificado qualquer alteração. Mas no primeiro ensaio, todos os provetes sofreram alterações das suas propriedades, perdendo rigidez. Outro facto importante, é que os provetes sujeitos a ciclos de variação de temperatura e humidade, não recuperaram a sua densidade original ao fim de 12 horas à temperatura ambiente.

Quanto á variação do volume, há diferenças em relação aos 2 procedimentos. No primeiro, ou seja, durante o ciclo de 2 horas em 2 horas, não se verificam variações significativas no comprimento. Os materiais tendem a variar ao longo do seu comprimento e não na espessura. Já no segundo tipo de ensaio, o grão 2-6 mm, teve uma variação máxima de 3 mm, num comprimento inicial de 198 mm. Também é importante referir que durante a fase de secagem, houve uma ligeira diminuição do comprimento, cerca de 1 mm. O que já não se verifica no grão 2-4 mm, onde o comprimento durante a imersão aumenta cerca de 3 mm e na secagem, recupera5 a 6 mm.

Por fim, da análise aos provetes de grão 1-2 mm, existe um aumento de 3 mm de comprimento, voltando ao seu comprimento inicial depois da secagem.

4.2. Ensaios de condutividade térmica

Neste subcapítulo, pretende-se caracterizar o material quanto à sua capacidade de isolamento, ou seja, obter a sua condutividade térmica. O resultado desejado é a obtenção de um baixo coeficiente de condutividade térmica. Como já foi referido, os valores obtidos nos ensaios realizados no DEM serão sempre simples aproximações do valor real. Já no segundo subcapítulo, os valores são oficiais, mas só foi analisado o grão 2-4 mm.

4.2.1. Ensaios nos laboratórios DEM

Para a realização destes ensaios serão testados provetes de tamanho de grão 2-6 mm, 2-4 mm e 1-2 mm. Nas tabelas 8, 9, 10 e 11 são apresentados todos os parâmetros relevantes para a determinação da condutividade térmica.

Avaliação da Amostra	
Diâmetro interno médio do isolamento (D_0)	24,80 mm
Diâmetro externo médio do isolamento (D_2)	45,00 e 65,00 mm
Comprimento Útil (L)	300,00 mm

Tabela 8- Dimensões das amostras

Resultados do teste (material 2-4 mm)			
Teste (Nº)	1	2	3
Temperatura ambiente média (T_a) [°C]	25,36	25,56	25,74
Temperatura média na superfície do Pipe (T_u) [°C]	37,25	37,74	40,95
Temperatura média na superfície exterior do isolamento (T_2) [°C]	28,40	27,94	28,93
Voltagem (V)	20	22	25
Potência de aquecimento (P) [W]	1,09	1,32	1,70
Condutividade térmica do isolamento (k) [W/m.k]	**0,0358**	**0,0404**	**0,0425**

Tabela 9- Resultados para o grão 2-4 mm

Resultados do teste (material 1-2 mm)			
Teste (Nº)	1	2	3
Temperatura ambiente média (T_a) [°C]	25,50	25,64	25,53
Temperatura média na superfície do Pipe (T_u) [°C]	35,98	36,58	39,98
Temperatura média na superfície exterior do isolamento (T_2) [°C]	29,10	29,14	29,98
Voltagem (V)	20	22	25
Potência de aquecimento (P) [W]	1,09	1,32	1,70
Condutividade térmica do isolamento (k) [W/m.k]	**0,0475**	**0,0531**	**0,0511**

Tabela 10- resultados para o grão 1-2 mm

Resultados do teste (2-6 mm)			
Teste (Nº)	1	2	3
Temperatura ambiente média (T_a) [°C]	25,50	25,57	25,43
Temperatura média na superfície do Pipe (T_u) [°C]	37,18	38,23	45,27
Temperatura média na superfície exterior do isolamento (T_2) [°C]	26,68	26,62	26,72
Voltagem (V)	20	22	25
Potência de aquecimento (P) [W]	1,09	1,32	1,70
Condutividade térmica do isolamento (k) [W/m.k]	**0,0596**	**0,0652**	**0,0527**

Tabela 11- resultados para o grão 2-6 mm

Estes resultados são analisados na secção 4.2.3.

4.2.2. Ensaios nos laboratórios ISQ

Dado o esquema de montagem, é necessário obter os seguintes valores:

- Temperatura ambiente média (T_a);
- Temperatura média na superfície do pipe (T_u);
- Temperatura média na superfície exterior do isolamento (T_2);
- Temperatura média do isolamento (T_m);
- Potência de aquecimento (ϕ).

Na tabela 12 são apresentadas as dimensões e massa volúmica à temperatura ambiente e antes da realização do ensaio.

Avaliação da Amostra	
Diâmetro interno médio do isolamento (D_0)	24,80 mm
Diâmetro externo médio do isolamento (D_2)	44,62 mm
Comprimento Útil (L)	197,50 mm
Densidade do isolamento	229,59 Kg/mm^3

Tabela 12- Condições iniciais para a amostra analisada de tamanho de grão 2-4 mm no ISQ

Então a condutividade térmica é dada por:

$$K = \frac{\phi \ln (D_2/D_0)}{2\pi(L + nD_u)(T_u - T_2)} \quad (14)$$

Com a correcção Nukiyama n=0,9.

Resultados do teste			
Teste (Nº)	1	2	3
Temperatura ambiente média (T_a) [°C]	23,35	23,86	23,94
Temperatura média na superfície do Pipe (T_u) [°C]	20,83	40,86	40,94
Temperatura média na superfície exterior do isolamento (T_2) [°C]	25,27	28,66	31,52
Temperatura média do isolamento (T_m) [°C]	27,55	34,76	40,73
Potência de aquecimento (P) [W]	0,44	1,18	1,82
Condutividade térmica do isolamento (k) [W/m.k]	**0,0407**	**0,0412**	**0,0420**

Tabela 13- Valores obtidos no ensaio com a correspondente condutividade térmica

Retirando o valor do primeiro grau da curva polinomial da relação entre a condutividade térmica e a temperatura média da superfície do Pipe, resulta a seguinte expressão:

$$\alpha = C_0 + C_1 T_0 \quad (15)$$

Com:

C_0- 0,0388

C_1-6,3974×10^{-5}

Obtendo-se os valores na tabela 14 dependendo da temperatura do Pipe.

Tabela de processamento de dados		
Ponto (Nº)	Temperatura do pipe (°C)	k (W/m.k)
1	10	0,0394
2	20	0,0400
3	30	0,0407
4	40	0,0413
5	50	0,0420

Tabela 14- Processamento de dados para a determinação da condutividade térmica em função da temperatura média do Pipe

4.2.3. Discussão dos resultados

Os valores obtidos para a condutividade térmica nos laboratórios do DEM foram pouco satisfatórios, influenciados também pelo setup experimental. Com a obtenção de diversas temperaturas, recorrendo às expressões correspondentes para o cálculo da condutividade, foi possível determinar este valor, embora de uma forma aproximada, pois a margem de erro é grande, como se pode confirmar quando a temperatura da superfície exterior varia desde os 10ºC até aos 50ºC. Já no ensaio realizado no ISQ, a variação da condutividade térmica é muito baixa para uma diferença de temperaturas de 40ºC. Outro dado importante relaciona-se com a temperatura á qual se associa a condutividade térmica. No ISQ relacionou-se com a temperatura média do Pipe.

Como facto relevante do ensaio realizado no DEM, verificou-se que o material de grão 2-4 mm é melhor isolante (menor condutividade térmica) que o material de grão 1-2 mm.

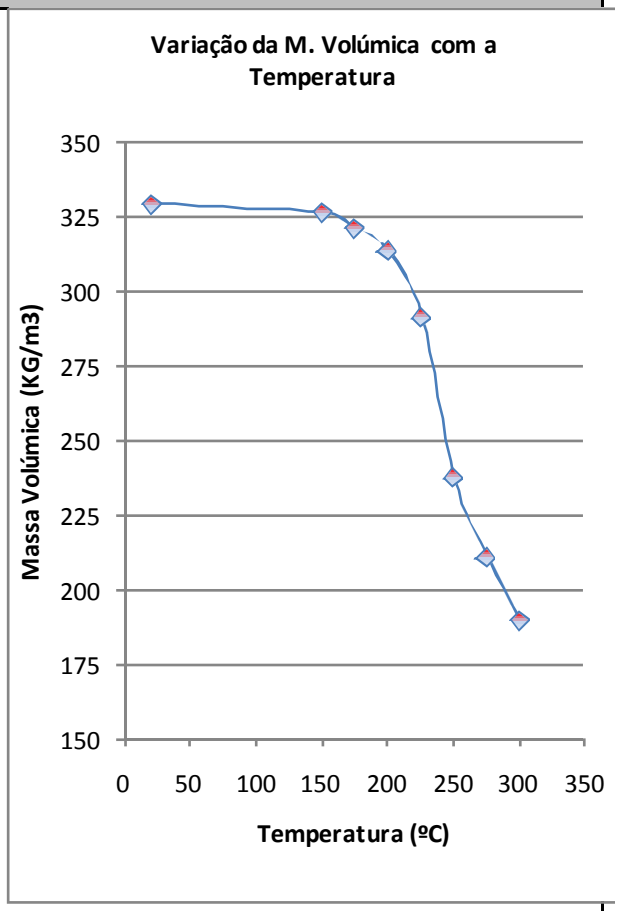
4.3. Ensaios de determinação da resistência ao calor

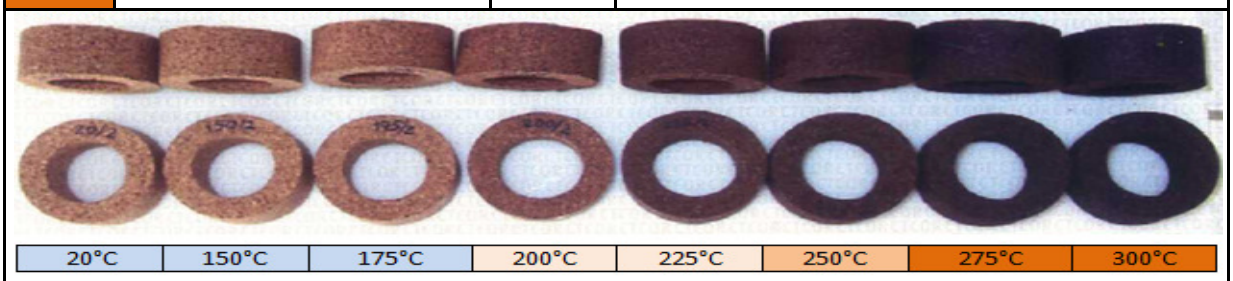
A figura 42 apresenta a variação da massa volúmica e a afectação que o material de tamanho de grão 1-2 mm sofre com o aumento da temperatura.

4.3.1. Temperatura Máxima de Exposição

Determinação da temperatura máxima de exposição

T	Aspecto Visual	M. V.
20°C	Regular	330 Kg/m^3
150°C	Ligeiríssimo escurecimento	327 Kg/m^3
175°C	Ligeira acentuação do escurecimento	322 Kg/m^3
200°C	Acentuação do escurecimento	314 Kg/m^3
225°C	Maior acentuação do escurecimento	292 Kg/m^3
250°C	Acentuação dos fenómenos registados a 225°C. Ligeiro fissuramento	238 Kg/m^3
275°C	Acentuação dos fenómenos registados a 250°C. Ligeiro empolamento dos grânulos	211 Kg/m^3
300°C	Afectação severa com evidente carburação do material	190 Kg/m^3





	Conservação da integridade do material
	Afectação física ligeira
	Afectação física moderada a forte
	Afectação física severa

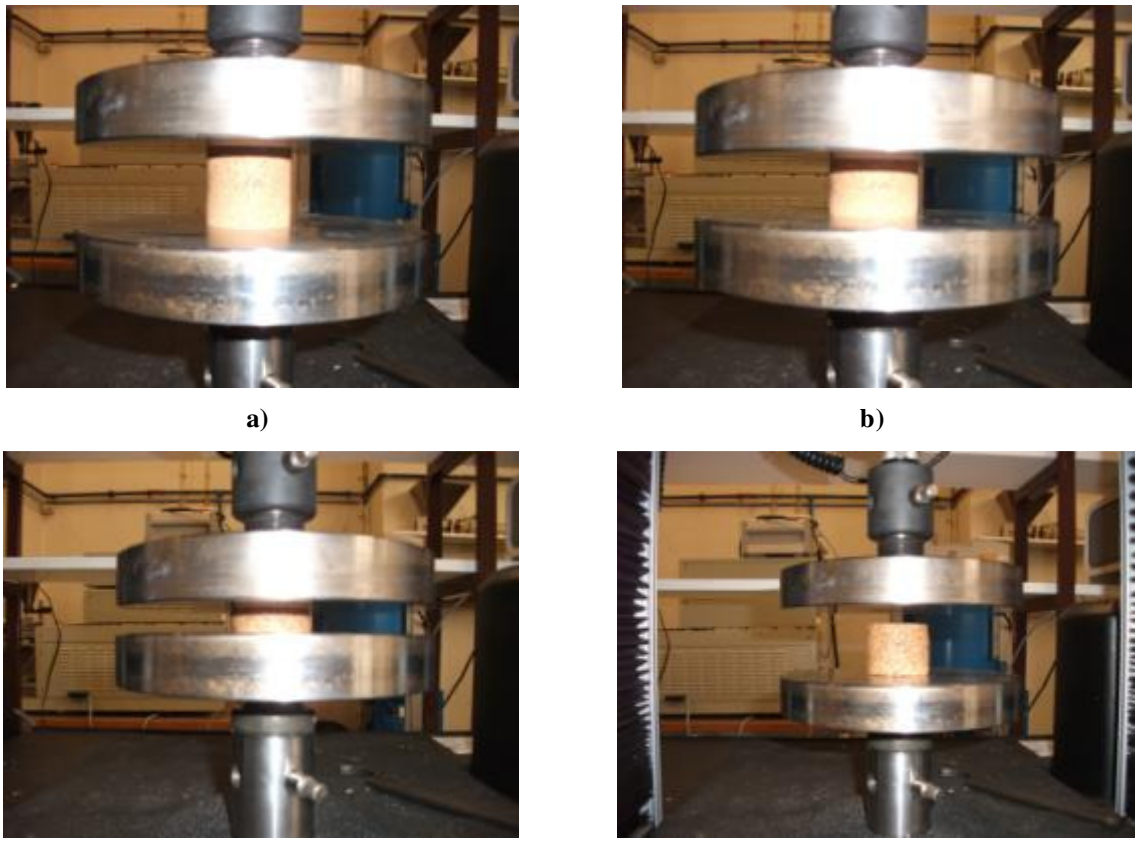
Figura 42- Descrição do ensaio para determinação da temperatura máxima

4.3.2. Discussão dos resultados

Tal como é possível de se verificar na figura 42, o material conserva a sua integridade até aos 175 °C, havendo uma ligeira variação da massa volúmica à temperatura ambiente de 330 Kg/m^3 para 322 Kg/m^3. Dos 200 °C até aos 225 °C, já se verificam algumas transformações no seu aspecto, como também a massa volúmica decresce consideravelmente.. Finalmente, a partir dos 275 ° o material fica completamente escurecido, tendo-se registado uma massa volúmica de 211 Kg/m^3, sendo que este valor ainda desce até aos 190 Kg/m^3 quando a temperatura aplicada sobre o material atinge os 300 °C.

4.4. Ensaios de compressão

As várias etapas durante a realização de um ensaio de compressão estão exemplificadas na figura 43.



a) **b)**

c) **d)**

Figura 43- Ensaio de compressão: a) montagem inicial; b) evolução do ensaio de compressão; c) fase final de compressão; d) remoção do provete e suas dimensões depois de ensaiado

4.4.1. Tubos de referência 45/25

Em todos os subcapítulos, os provetes analisados serão distinguidos segundo os seus diâmetros. Desta forma, os tubos de referencia 45/25 são provetes com diâmetro exterior e interior de 45 mm e 25 mm respectivamente, e os tubos de referencia 65/25 são provetes com diâmetro exterior e interior de 65 mm e 25 mm, respectivamente.

Nas figuras 44, 45, 46 e 47 estão representadas as curvas de compressão de cada material a diferentes velocidades.

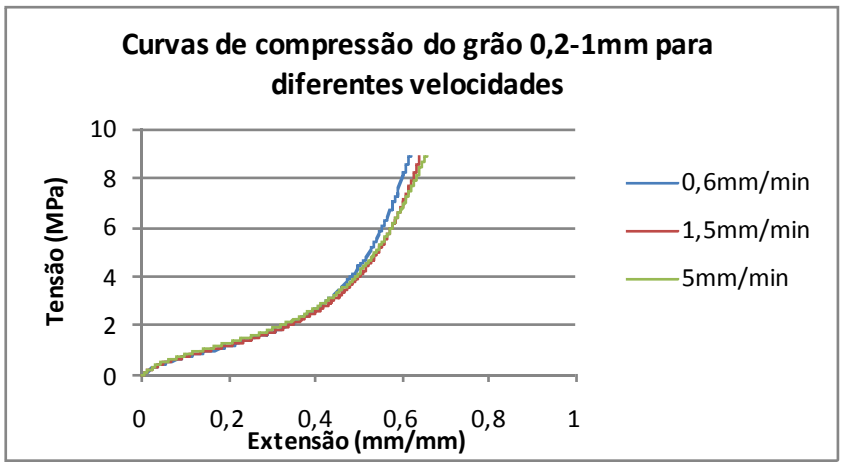


Figura 44- Curvas de tensão-extensão em compressão para diferentes velocidades do grão 0,2-1mm

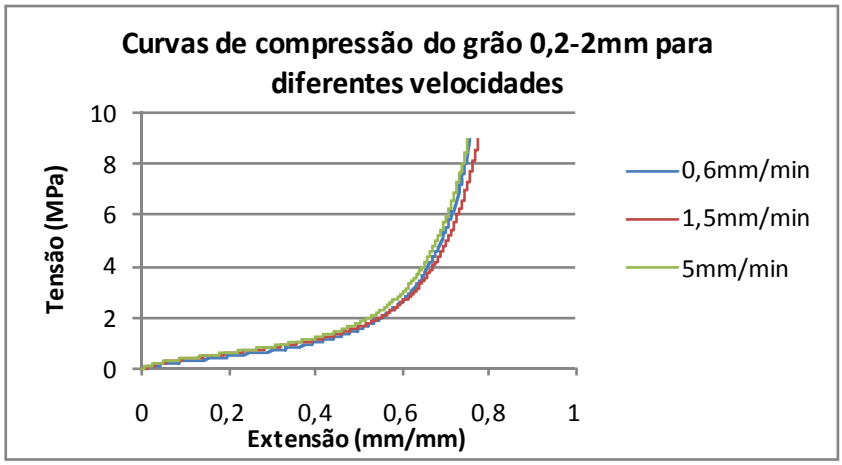


Figura 45- Curvas de tensão-extensão em compressão para diferentes velocidades do grão 0,2-2 mm

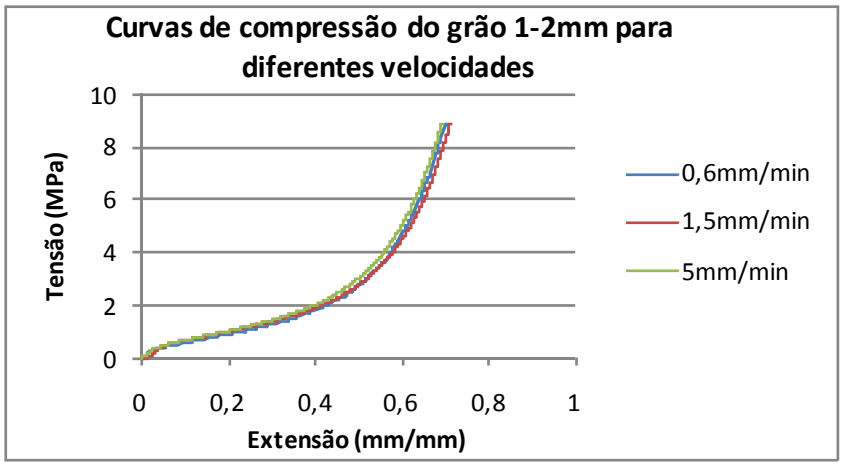


Figura 46- Curvas de tensão-extensão em compressão para diferentes velocidades do grão 1-2 mm

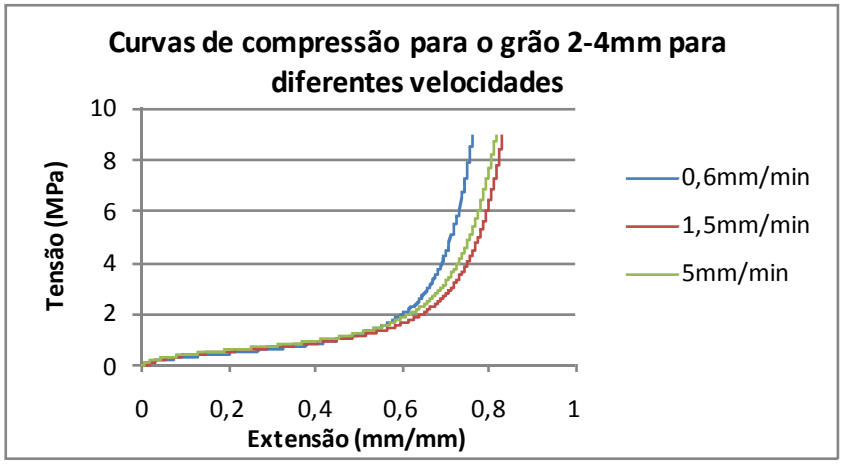


Figura 47- Curvas de tensão-extensão em compressão para diferentes velocidades do grão 2-4 mm

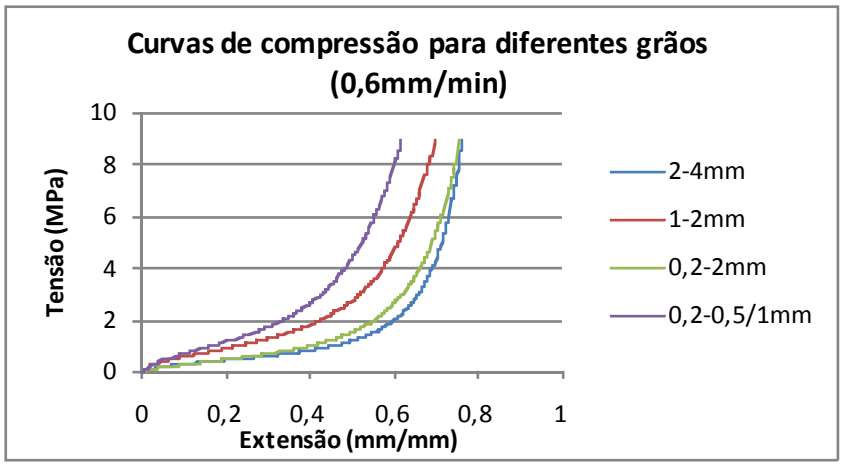


Figura 48-Curvas tensão-extensão em compressão para diferentes grãos à velocidade de 0,6mm/min

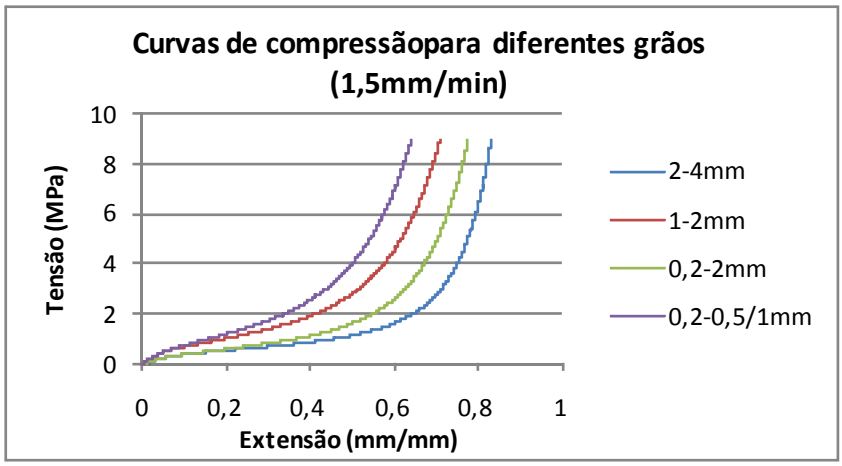


Figura 49- Curvas tensão-extensão em compressão para diferentes grãos à velocidade de 1,5mm/min

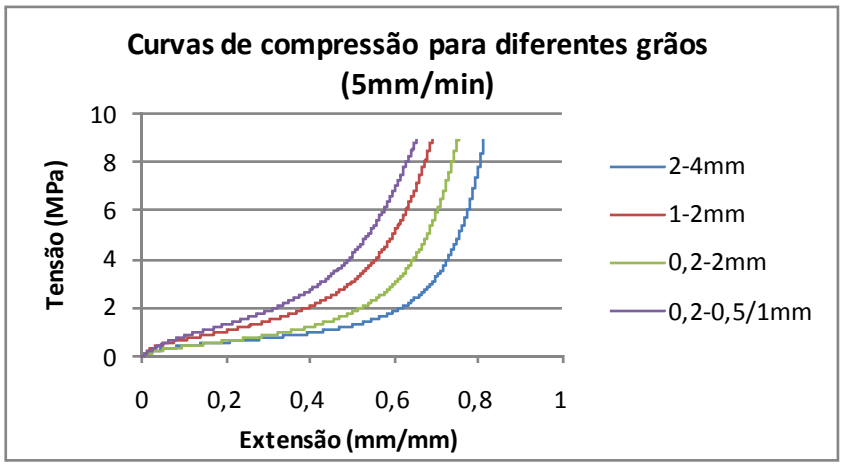


Figura 50- Curvas tensão-extensão em compressão para diferentes grãos à velocidade de 5mm/min

Nas tabelas 15, 16, 17 e 18 são apresentados todos os parâmetros importantes de análise à compressão dos diferentes materiais.

	Módulo de Elasticidade à compressão (MPa)		
Grão (mm)	V=0,6 mm/min	V=1,5mm/min	V=5min/min
2-4	4,691	6,456	6,677
1-2	10,745	12,724	12,353
0,2-2	3,938	5,697	6,248
0,2-0,5/1	10,616	11,048	12,559

Tabela 15- Modulo de elasticidade dos materiais para velocidades diferentes

Tamanho grão (mm)	Massa volumica (kg/m3)	Altura inicial (mm)	Deslocamento prato compressão (mm)	Extensão a 9800N (mm/mm)	Tensão máxima (MPa)	Força máxima (N)	Vel ensaio (mm/min)
0,2-1	362	60	37,10	0,61	0,618	679,6	0,6
0,2-2	273,7	57	43,18	0,75	0,265	291,7	0,6
1-2	316	58	40,44	0,69	0,489	537,9	0,6
2-4	212	60	45,72	0,76	0,282	310,6	0,6
0,2-1	362	58	37,21	0,64	0,653	717,8	1,5
0,2-2	273,7	58	45,04	0,77	0,301	330,8	1,5
1-2	316	55	39,03	0,70	0,549	603,4	1,5
2-4	212	57	47,39	0,83	0,426	468,8	1,5
0,2-1	362	57	37,27	0,65	0,690	759,2	5
0,2-2	273,7	57	42,87	0,75	0,337	370,1	5
1-2	316	58	40,09	0,75	0,577	634,6	5
2-4	212	56	45,65	0,81	0,367	403,7	5

Tabela 16- Analise de parâmetros relativos à compressão para os diferentes grãos em relação à velocidade

Tamanho grão (mm)	Massa volumica (kg/m3)	Altura inicial (mm)	Deslocamento do prato compressão (mm)	Extensão a 9800N (mm/mm)	Tensão máxima (MPa)	Força máxima (N)	Vel ensaio (mm/min)
0,2-1	362	60	37,10	0,61	0,618	679,6	0,6
0,2-1	362	58	37,21	0,64	0,653	717,8	1,5
0,2-1	362	57	37,27	0,65	0,690	759,2	5
0,2-2	273,7	57	43,18	0,75	0,265	291,7	0,6
0,2-2	273,7	58	45,04	0,77	0,301	330,8	1,5
0,2-2	273,7	57	42,87	0,75	0,337	370,1	5
1-2	316	58	40,44	0,69	0,489	537,9	0,6
1-2	316	55	39,03	0,70	0,549	603,4	1,5
1-2	316	58	40,09	0,75	0,577	634,6	5
2-4	212	60	45,72	0,76	0,282	310,6	0,6
2-4	212	57	47,39	0,83	0,426	468,8	1,5
2-4	212	56	45,65	0,81	0,367	403,7	5

Tabela 17- Analise de parâmetros relativos à compressão para o mesmo grão com velocidades diferentes

Tabela com dimensões dos provetes durante a análise						
Velocidade (mm/min)	Tempo		2-4mm	1-2mm	0,2-2mm	0,2-0,5/1mm
0,6	Inicial		60	58	57	60
	2s após remoção		37	35	33	38
	24h após remoção		49	50	46	50
1,5	Inicial		57	58	58	58
	2s após remoção		36	36	34	38
	24h após remoção		49	48	48	50
5	Inicial		56	58	57	57
	2s após remoção		36	38	33	40
	24h após remoção		49	50	49	52
	24h após remoção					
0,6	Diâmetro (mm)	Interior	25	24	25	25
		Exterior	46	46	46	46
1,5	Diâmetro (mm)	Interior	25	25	25	25
		Exterior	47	46	45	45
5	Diâmetro (mm)	Interior	24	24	25	25
		Exterior	46	45	45	45

Tabela 18- Dimensões dos provetes antes e depois de submetidos ao ensaio de compressão

4.4.2. Tubos de referência 65/25

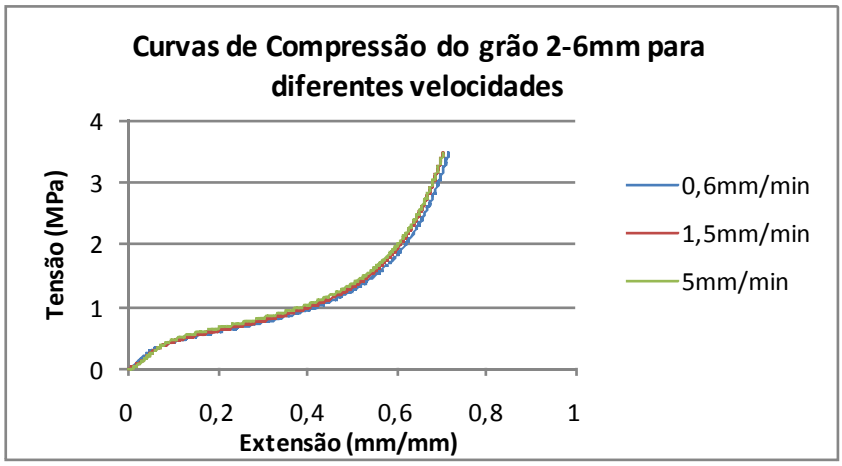


Figura 51- Curvas de compressão do grão 2-6mm para diferentes velocidades

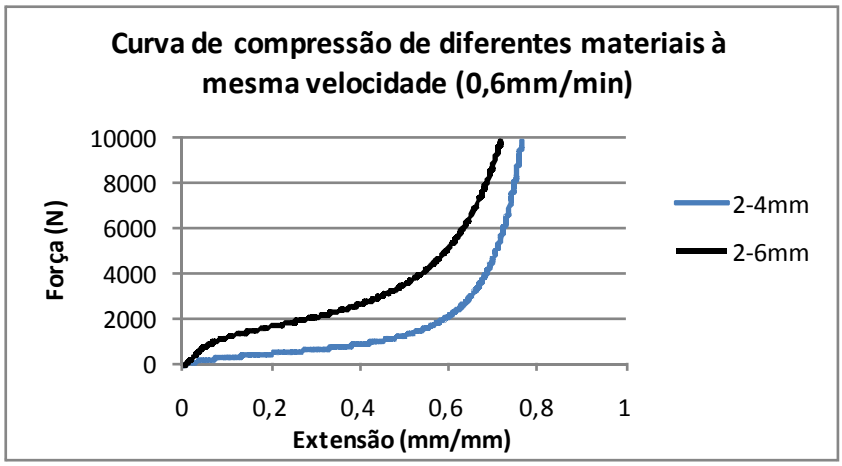


Figura 52- Curvas de compressão dos materiais de grão 2-4 mm e 2-6 mm à velocidade 0,6mm/min

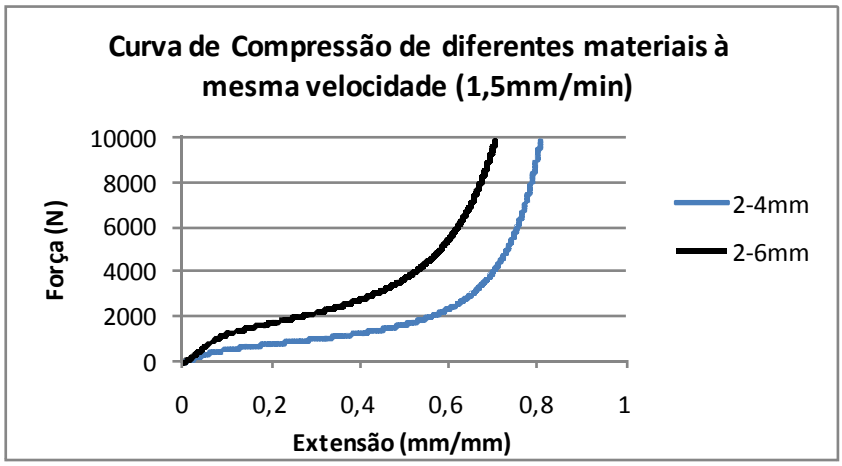


Figura 53- Curvas de compressão dos materiais de grão 2-4 mm e 2-6 mm à velocidade 1,5mm/min

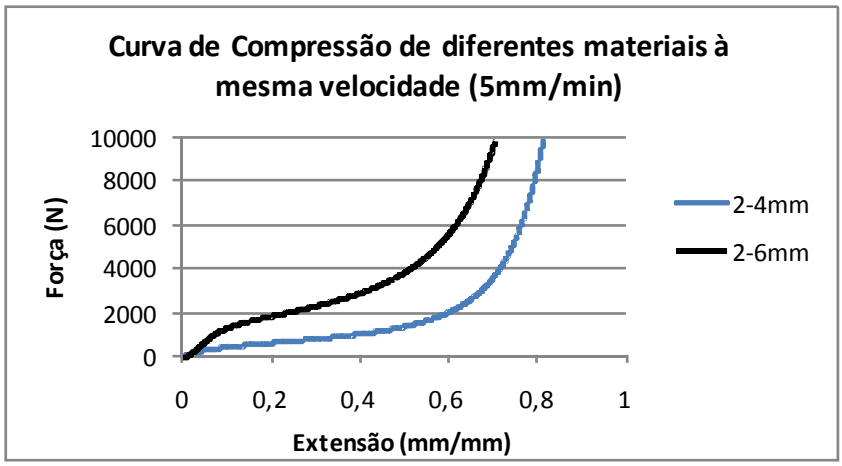


Figura 54- curva de compressão dos materiais de grão 2-4mm e 2-6mm para a velocidade 5mm/min

Nas tabelas 19 e 20 encontram-se especificados os principais parâmetros de análise à compressão a diferentes velocidades para os provetes de tamanho de grão 2-4 mm e 2-6 mm.

A tabela 21 apresenta a variação de tamanho dos provetes depois de realizado o ensaio como também a sua recuperação elástica.

Tamanho grão (mm)	Massa volumica (kg/m3)	Altura inicial (mm)	Deslocamento prato compressão (mm)	Extensão a 9800N (mm/mm)	Tensão máxima (MPa)	Força máxima (N)	Vel ensaio (mm/min)
2-4	212	60	45,72	0,76	0,282	310,6	0,6
2-4	212	57	47,39	0,83	0,426	468,8	1,5
2-4	212	56	45,65	0,81	0,367	403,7	5
2-6	250	60	42,86	0,71	0,365	1031,1	0,6
2-6	250	60	42,31	0,71	0,516	1459,7	1,5
2-6	250	60	42,25	0,70	0,558	1578,6	5

Tabela 19- Analise de parâmetros relativos à compressão para o grão 2-4mm e 2-6mm com velocidades diferentes

	Módulo de Elasticidade à compressão (MPa)		
Grão (mm)	V=0,6 mm/min	V=1,5mm/min	V=5min/min
2-4	4,691	6,456	6,677
2-6	7,295	6,061	6,122

Tabela 20- Modulo de Elasticidade para os materiais de tamanho de grão 2-4mm e 2-6mm para velocidades diferentes

Tabela com dimensões dos provetes durante a análise				
Grão				
Velocidade (mm/min)	Tempo		2-4mm	2-6mm
0,6	Inicial		60	60
	2s após remoção		37	42
	24h após remoção		49	55
1,5	Inicial		57	60
	2s após remoção		36	45
	24h após remoção		49	55
5	Inicial		56	60
	2s após remoção		36	47
	24h após remoção		49	57
	24h após remoção			
0,6	Diâmetro (mm)	Interior	25	24
		Exterior	46	66
1,5	Diâmetro (mm)	Interior	25	23
		Exterior	47	65
5	Diâmetro (mm)	Interior	24	24
		Exterior	46	65

Tabela 21- Dimensões dos provetes após finalização do ensaio

4.4.3. Análise do material sujeito a elevadas temperaturas

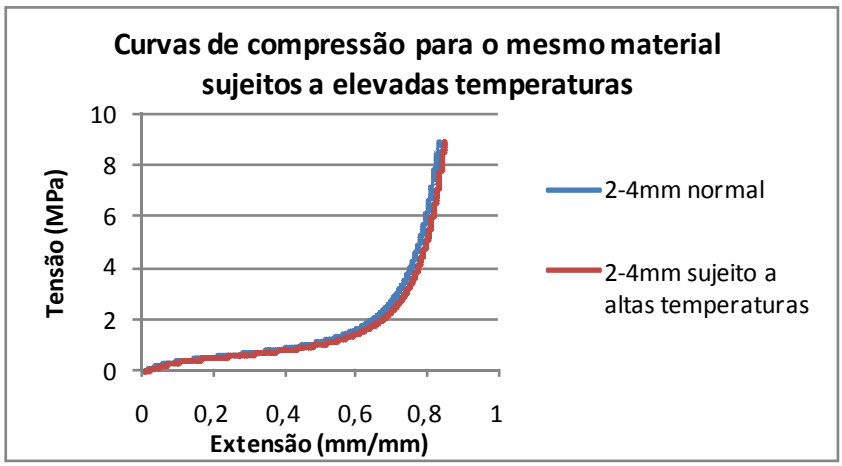


Figura 55- Curvas de compressão para o material de tamanho de grão 2-4mm, em condições de temperatura ambiente e depois de sujeito a ambiente com elevada temperatura (150°C)

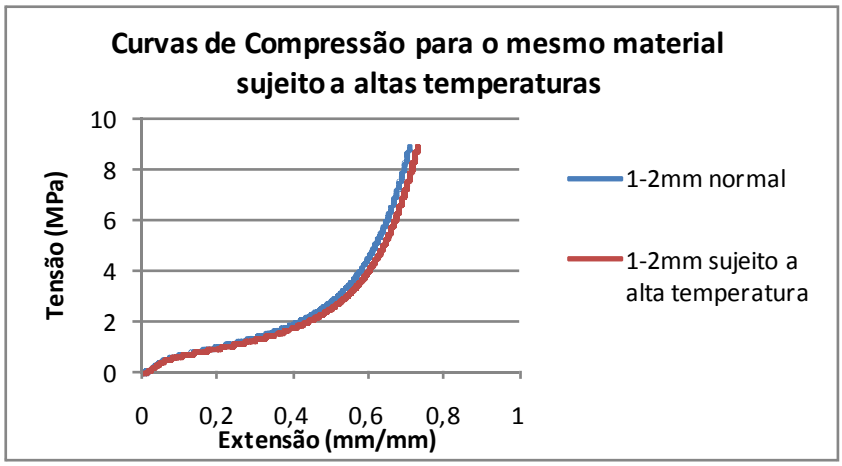


Figura 56- Curvas de compressão para o material de tamanho de grão 1-2 mm, em condições de temperatura ambiente e com elevada temperatura (150°C)

Tamanho grão (mm)	Massa volúmica (kg/m3)	Altura inicial (mm)	Compressão Max (9800N) (mm)	Extensão a 9800N (mm/mm)	Tensão máxima (MPa)	Força máxima (N)	Vel ensaio (mm/min)
2-4	212	57	47,39	0,83	0,426	468,8	1,5
2-4 AT	212	60	50,96	0,85	0,502	552,6	1,5
1-2	316	55	39,03	0,70	0,549	603,4	1,5
1-2AT	316	60	43,88	0,73	0,716	787,5	1,5

Tabela 22- Analise de parâmetros relativos à compressão para o grão 1-2mm e 2-4mm sujeito ou não a condições com elevadas temperaturas

	Módulo de Elasticidade à compressão (MPa)
Grão (mm)	
2-4	6,456
2-4 AT	2,956
1-2	12,724
1-2 AT	7,539

Tabela 23- Modulo de Elasticidade dos materiais de tamanho de grão 1-2mm sujeitos ou não a condições com elevadas temperaturas

4.4.4. Analise do material sujeito a condições de humidade

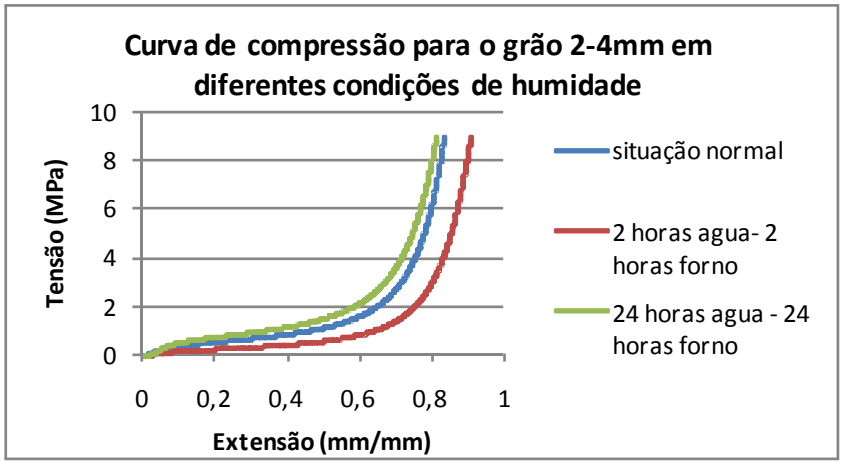


Figura 57- Curvas de compressão para o material de grão 2-4mm em diferentes condições de humidade

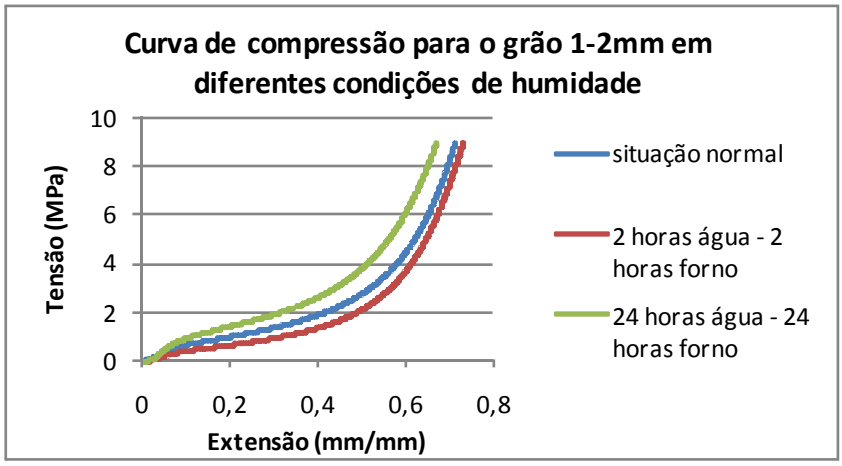


Figura 58- Curvas de compressão para material de grão 1-2mm em diferentes condições de humidade

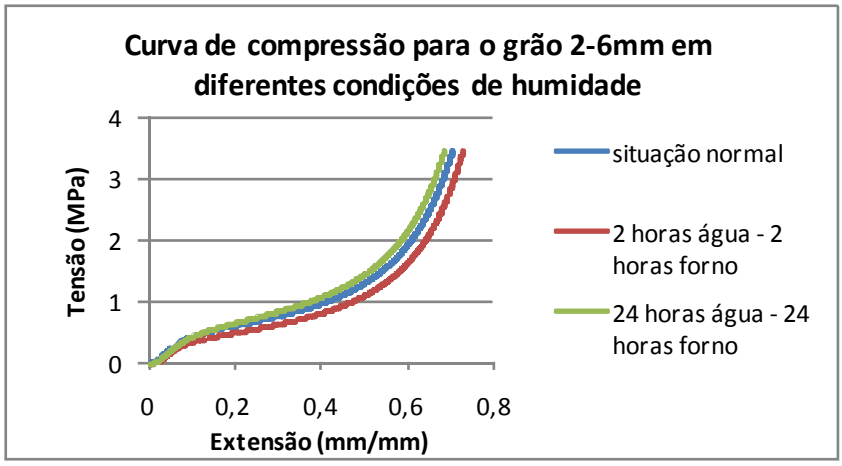


Figura 59- Curvas de compressão do material de grão 2-6mm em diferentes condições de humidade

Na tabela 24 é possível comparar para os grãos 2-4 mm. 1-2 mm e 2-6 mm o seu comportamento à compressão tendo os provetes sido submetidos a diferentes condições de humidade.

Os Módulos de Elasticidade estão representados na tabela 25. As dimensões dos provetes antes e após o ensaio são apresentados nas tabelas 26 e 27.

Tamanho grão (mm)	Massa volumica (kg/m3)	Altura inicial (mm)	Compressão Max (9800N) (mm)	Extensão a 9800N (mm/mm)	Tensão máxima (MPa)	Força máxima (N)	Vel ensaio (mm/min)
2-4	212	57	47,39	0,83	0,426	468,8	1,5
2-4 2h-2h	253	60	54,23	0,90	0,188	206,6	1,5
2-4 24h-24h	287	60	48,48	0,81	0,536	589,2	1,5
1-2	328	55	39,03	0,70	0,549	603,4	1,5
1-2 2-2h	368	60	43,71	0,79	0,322	354,6	1,5
1-2 24h-24h	393	60	40,09	0,67	0,978	1075,8	1,5
2-6	250	60	42,31	0,71	0,516	1459,7	1,5
2-6 2h-2h	264	60	43,66	0,73	0,256	722,5	1,5
2-6 24h-24h	275	60	40,89	0,68	0,471	1330,6	1,5

Tabela 24- Analise de parâmetros relativos à compressão para o grão 2-4mm, 1-2mm e 2-6mm para diferentes condições de humidade

	Módulo de Elasticidade à compressão (MPa)
Grão (mm)	
2-4	6,456
2-4 (2h-2h)	2,323
2-4 (24h-24h)	8,687
1-2	12,724
1-2 (2h-2h)	7,144
1-2 (24h-24h)	15,031
2-6	6,061
2-6 (2h-2h)	5,557
2-6 (24h-24h)	5,257

Tabela 25- Modulo de Elasticidade para os materiais em diferentes condições de humidade

Tabela com dimensões dos provetes durante a análise					
Ensaio 2 horas na água -2 horas no forno (3 vezes)					
Velocidade (mm/min)	Tempo		2-4 mm	1-2 mm	2-6 mm
1,5	Inicial		60	60	60
	2s após remoção		38	42	38
	24h após remoção		52	51	57
	24h após remoção				
1,5	Diâmetro (mm)	Interior	25	25	25
		Exterior	45	45	65

Tabela 26- Dimensões dos provetes depois do ensaio de compressão com materiais sujeitos ao ciclo de humidade (2 horas imersão 2 horas forno)

Tabela com dimensões dos provetes durante a análise					
Ensaio 24 horas na água -24 horas no forno					
Velocidade (mm/min)	Tempo		2-4 mm	1-2 mm	2-6 mm
1,5	Altura Inicial		60	60	60
	2s após remoção		37	40	36
	24h após remoção		55	55	55
	24h após remoção				
1,5	Diâmetro (mm)	Interior	25	25	25
		Exterior	45	45	65

Tabela 27- Dimensões dos provetes depois do ensaio de compressão com materiais sujeitos a 24 horas de imersão e 24 horas de secagem

4.4.5. Análise dos resultados

O aumento da velocidade de deformação, tem como consequência um aumento da tensão para uma mesma extensão. Na primeira região, cujas tensões e deformações são ainda pequenas, o declive é elevado, definindo o Módulo de Elasticidade, que na cortiça se define numa região de deformação viscoelástica. Verifica-se que o Módulo de Elasticidade aumenta com o aumento da velocidade, à excepção do material com 20 mm de espessura. Como é possível verificar nas curvas de compressão, estas têm a concavidade para baixo na zona elástica, pois a rigidez diminui com o aumento da extensão. Na segunda região, as células entram em colapso, resultando num aumento muito baixo da tensão com um significativo aumento da extensão. Por fim, numa terceira fase, ocorre o esmagamento das células, onde a tensão aumenta rapidamente. Estes factos, são confirmados neste trabalho.

A importância desta análise está na avaliação da resistência à compressão de cada grão. Na aplicação de uma força, limitada a 9800N pela máquina utilizada, as curvas de compressão provam que o material mais resistente, aquele em que para uma dada extensão tem um valor mais elevado tanto de força como tensão, é o material constituído por grãos de tamanho 0,2 a 1 mm. Pelo contrario, os materiais de grão de tamanho 2 a 4 mm, verifica-se que se aplica uma força muito menor que nos três restantes casos para uma mesma extensão, ou, de outro modo, para uma mesma tensão e /ou força, a extensão será sempre maior. Numa avaliação quanto aos seus campos de aplicação, é possível concluir que o material mais resistente, que também sofrerá menores deformações é o de grão 0,2 a 0,5 e 1 mm. Mas, caso a aplicação deste material tenha como objectivo, poder ser fortemente deformado ou que o esforço para o deformar seja pequeno, então o material a usar deve ser o de grão de 2-4 mm.

Conforme a norma ASTM C365, a tensão máxima é obtida a 2% da deformação total. Dos valores obtidos, há algumas considerações a ter em conta. Como já foi dito, com o aumento da velocidade de deformação, aumenta também a força numa mesma extensão, verificando-se isso na primeira e terceira zona. Já na segunda, verifica-se uma grande proximidade dos valores da tensão para qualquer uma das três velocidades. Daí que, a tensão máxima de um material seja maior quando o ensaio se realiza a 5 mm/min do que a 1,5 mm/min, este ultimo maior que a 0,6 mm/min.

Portanto, como seria de esperar, a maior tensão máxima é a do material constituído por grãos de 0,2 a 1,0 mm ou seja de 0,618MPa. No entanto, a menor não é do material com tamanho de grão de 2 a 4mm (0,426 MPa), verifica-se que na zona elástica o material de grão 0,2-2mm tem tensões mais baixas, cujo valor da tensão máxima seja de 0,265 MPa. Só na segunda zona os seus valores irão subir de tal forma que passam a ser mais elevados que o de grão 2 a 4mm.

A comparação dos materiais 2-4 mm e 2-6 mm deve-se á semelhança de densidades, portanto, pretende-se avaliar quais as vantagens ou desvantagens que advêm da utilização de um material com o dobro da espessura. Em compressão, a tensão máxima será ligeiramente superior, embora se passe o contrário em relação ao Módulo de Elasticidade.

Outro dado importante, tem a ver com a variação das dimensões dos provetes depois de retirados da máquina de ensaio, cujos valores se encontram nas tabelas 18 e 21. Todos os provetes, dois segundos após a sua remoção da máquina apresentaram valores a rondar os 35 a 40 mm, e, 24 horas depois, o seu tamanho final é próximo dos 50 mm, menos 10mm que o seu tamanho original antes de comprimidos. Ou seja, estes materiais, durante 2 segundos recuperam cerca de 20 mm, e nas restantes 24 horas, apenas 10mm. O provete que, nos dois primeiros segundos, recupera mais facilmente, é o de tamanho de grão de 2 a 4mm. Verifica-se que quanto maior é a velocidade de deformação, maior será a recuperação das suas dimensões. Quanto aos diâmetros interior e exterior, estes quase não se modificam com o aumento da velocidade de deformação, ou seja, para baixas velocidades de deformação, tornam o ensaio mais longo e afectam também as dimensões do tubo a nível radial.

Já os materiais submetidos a elevada temperatura, o comportamento em compressão é muito semelhante aos materiais expostos à temperatura ambiente, mas, o Módulo de Elasticidade dos primeiros é muito inferior. A deformação que estes materiais sofrem para um dado limite de força, neste caso 9800N, é ligeiramente superior, como também a tensão máxima terá valores mais elevados. Deste modo, conclui-se que estes materiais, estando aplicados em ambientes onde as temperaturas forem elevadas (150ºC), serão afectados nas suas propriedades mecânicas, embora de um modo suave. Tal também se tinha verificado no ensaio descrito no subcapítulo 4.3, embora fosse possível ver um ligeiro escurecimento na superfície exterior do isolamento.

Por fim, depois da realização dos ensaios de humidade, os provetes foram testados à compressão e à flexão. Os provetes em estudo foram os materiais de tamanho de grão 2-4 mm, 1-2 mm e 2-6 mm. Para todos os casos analisados, verificou-se que os provetes sujeitos ao ciclo de 2 horas

na água e 2 horas no forno, foram os mais comprimidos quando se atingiam os 9800N de carga máxima. Por outro lado, quando os provetes foram imersos 24 horas na água e 24 horas no forno, a sua resistência à compressão aumentou, sendo portanto os menos deformados. Quanto à rigidez do material, verifica-se que para os provetes com 10 mm de espessura, o Módulo de Elasticidade é um pouco maior quando os provetes são sujeitos à imersão durante 24 horas seguido de secagem durante o mesmo período de tempo, que provetes em condições normais (temperatura ambiente). Acresce o facto de a densidade ser também semelhante. Mas, no caso de os provetes serem do tipo A (2horas na água e 2 horas no forno), a sua rigidez irá diminuir quase um terço, o que comprova que as propriedades dos materiais foram alteradas. O mesmo já não se passa para provetes de tamanho de grão 2-6 mm. Devido à sua baixa capacidade para absorver água, a sua rigidez irá decrescer ligeiramente, para qualquer um dos métodos a que foram submetidos para a análise à humidade.

Quanto à recuperação dos provetes depois do ensaio, os resultados concordam com o que foi descrito anteriormente. A recuperação do comprimento, passado 24 horas, em provetes com 10 mm de espessura, para provetes do tipo B é muito maior que em provetes do tipo A, embora se passe completamente o contrário quando se mede o comprimento 2 segundos após finalizado o ensaio. O que significa que a presença de água nos materiais faz com que haja uma recuperação inicial maior nos de tipo A, mas fica longe de atingir as dimensões iniciais. Já os provetes de tamanho de grão 2-6 mm apresentam a mesma evolução na recuperação do comprimento nos dois métodos de análise à humidade.

4.5. Ensaios de Flexão a 3 pontos

A figura 61 apresenta 4 fases diferentes do ensaio de flexão, onde é possível observar o equipamento utilizado no ensaio como também o posicionamento dos provetes.

a) **b)**

c) **d)**

Figura 60- Diferentes fases no ensaio de flexão: a) inicio do ensaio sem qualquer carga aplicada; b) aplicação inicial de uma força; c) provete já flectido; d) estado do provete momentos antes da ruptura

4.5.1. Tubos de referência 45/25

A figura 61 apresenta as curvas Força-deslocamento em flexão a 3 pontos dos diferentes materiais, cujos valores estão registados na tabela 28 e 29. Para a determinação da extensão e forças máximas, segue-se o cumprimento da norma ASTM C790.

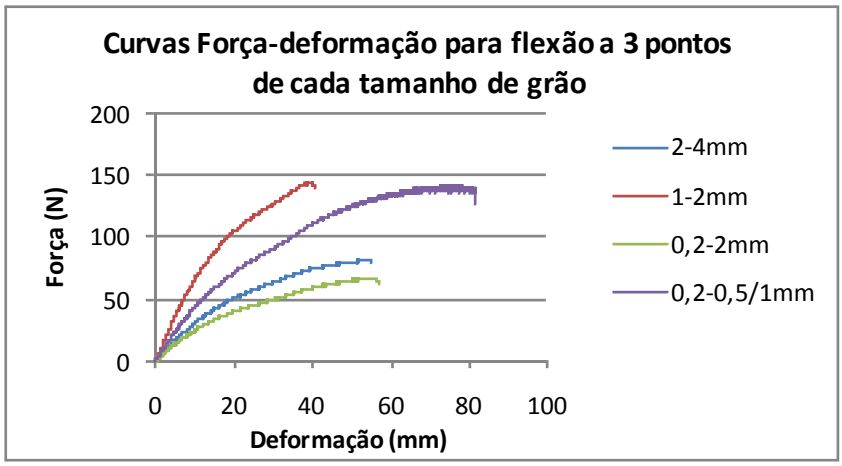


Figura 61-Curvas Força-deformação em flexão a 3 pontos para diferentes tamanhos de grão

Grão (mm)	Força máxima (N) (0,05)	Extensão máxima (mm/mm)(0,05)	Deformação máxima (mm) (0,05)	Força de ruptura (N)	Deformação de ruptura (mm)	Extensão ruptura (mm/mm)	Tempo (s)
2-4	76,84	0,114	43,24	81,03	54,92	0,145	387,7
1-2	143,49	0,102	38,76	144,05	39,55	0,104	279,2
0,2-2	59,92	0,108	40,99	66,76	56,34	0,148	397,7
0,2-1	118,81	0,118	44,87	127,12	81,20	0,214	573,2

Tabela 28-Analise de parâmetros relativos à flexão a 3 pontos para diferentes grãos

	Módulo de Elasticidade à flexão (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Grão (mm)		
2-4	12,256	0,800
1-2	25,929	1,288
0,2-2	10,323	0,659
0,2-1	17,529	1,137

Tabela 29- Módulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os diferentes materiais

4.5.2. Tubos de referência 65/25

Na figura 62 está representada a curva Força-deslocamento dos materiais 2-4 mm e 2-6 mm, estando nas tabelas 30 e 31 determinados os valores dos vários parâmetros.

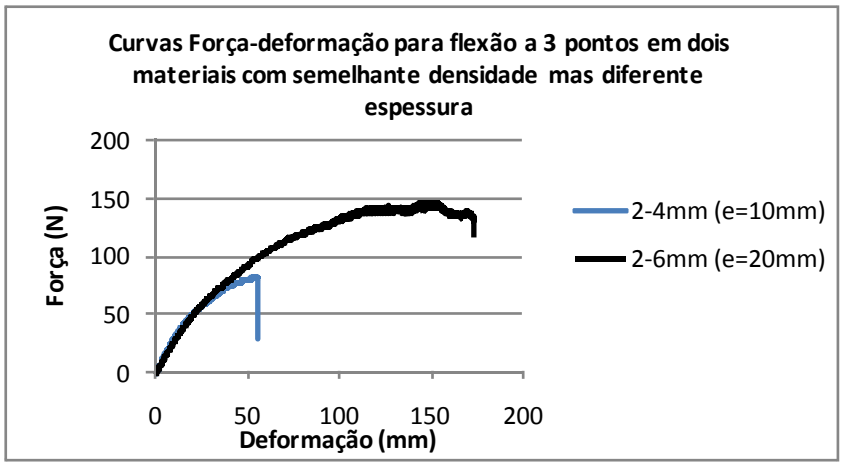


Figura 62- Curvas Força-deformação para flexão em 3 pontos para os materiais de tamanho de grão 2-4 mm e 2-6 mm

Grão (mm)	Força máxima (N) (0,05)	Extensão máxima (mm/mm)(0,05)	Deformação máxima (mm) (0,05)	Tempo (s) (0,05)	Força de ruptura (N)	Deformação de ruptura (mm)	Extensão ruptura (mm/mm)	Tempo (s)
2-4	76,84	0,114	43,24	305	81,03	54,92	0,145	387
2-6	133,00	0,097	101,75	359	117,69	173,15	0,165	611

Tabela 30- Analise dos principais parâmetros na análise à flexão dos materiais de tamanho de grão 2-4mm e 2-6mm

Grão (mm)	Módulo de Elasticidade à flexão (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
2-4	12,256	0,800
2-6	16,511	0,714

Tabela 31- Modulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os materiais de tamanho de grão 2-4mm e 2-6mm

4.5.3. Análise do material sujeito a Elevadas temperaturas

Depois da realização dos ensaios de condutividade térmica onde os materiais estiveram submetidos a temperaturas que rondavam os 150 °C, foi necessário verificar se estes materiais sofreriam alterações no seu comportamento mecânico. Os resultados encontram-se nas figuras 63 e 64, com o registo dos principais parâmetros nas tabelas 32 e 33.

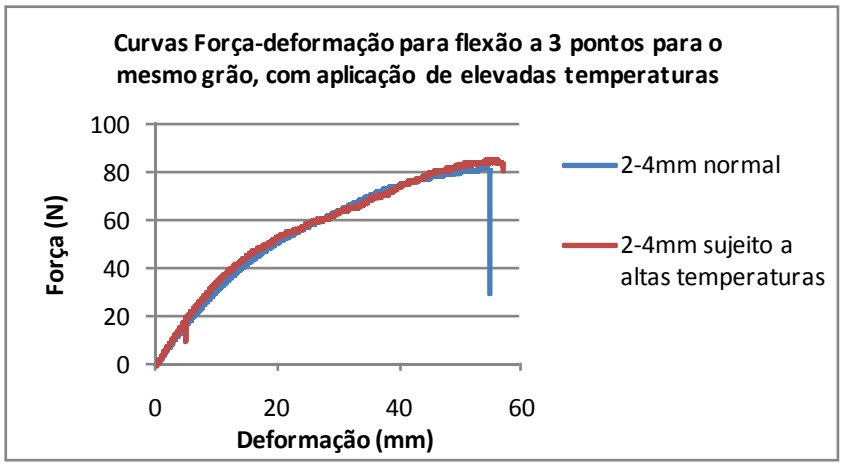


Figura 63- Curva Força-deformação para a flexão a 3 pontos comparando materiais de tamanho de grão 2-4 mm sujeitos a condições normais (temperatura ambiente) e materiais sujeitos a altas temperaturas (150°C)

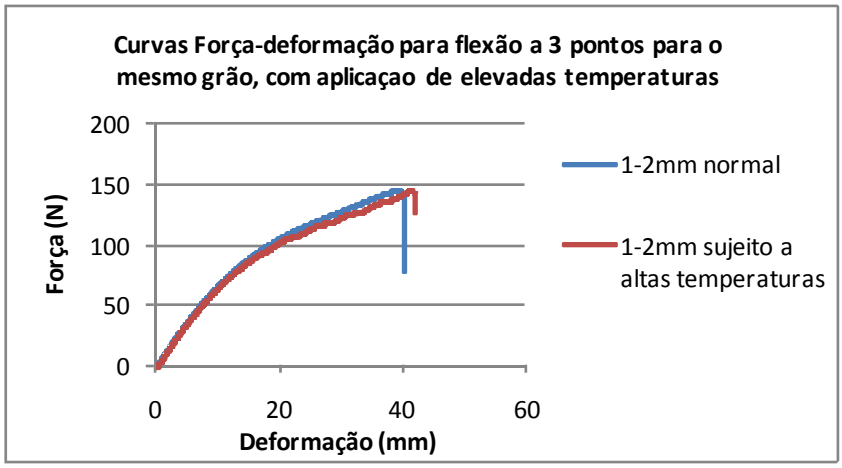


Figura 64- Curva Força-deformação para a flexão a 3 pontos comparando materiais de tamanho de grão 1-2 mm sujeitos a condições normais (temperatura ambiente) e materiais sujeitos a altas temperaturas (150°C)

Grão (mm)	Força máxima (N) (0,05)	Extensão máxima (mm/mm)(0,05)	Deformação máxima (mm) (0,05)	Tempo (s) (0,05)	Força de ruptura (N)	Deformação de ruptura (mm)	Extensão ruptura (mm/mm)	Tempo (s)
2-4	76,84	0,114	43,24	305	81,03	54,92	0,145	387
2-4 AT	69,53	0,096	36,4	257	80,34	56,84	0,149	401
1-2	143,49	0,102	38,76	273	144,05	39,55	0,104	279
1-2 AT	136,48	0,102	38,53	272	125,57	41,76	0,110	295

Tabela 32- Analise dos principais parâmetros na análise à flexão dos materiais de tamanho de grão 2-4mm e 1-2mm sujeitos a diferentes temperaturas

Grão (mm)	Módulo de Elasticidade à flexão (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
2-4	12,256	0,800
2-4 AT	13,993	0,794
1-2	25,929	0,142
1-2 AT	24,560	0,124

Tabela 33- Modulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os materiais de tamanho de grão 2-4mm e 1-2mm sujeitos ou não a diferentes temperaturas

4.5.4. Análise do material sujeito a condições de humidade

Os provetes que foram colocados na agua e seguidamente no forno, em períodos de tempo diferentes, tiveram grande importância para se determinar o comportamento destes durante os ensaios de tracção.

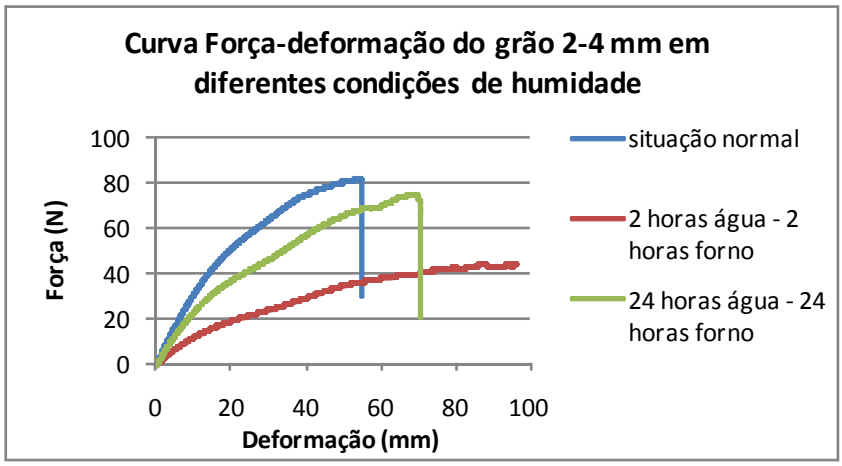


Figura 65- Curva Força-deformação do grão 2-4 mm em diferentes condições de humidade

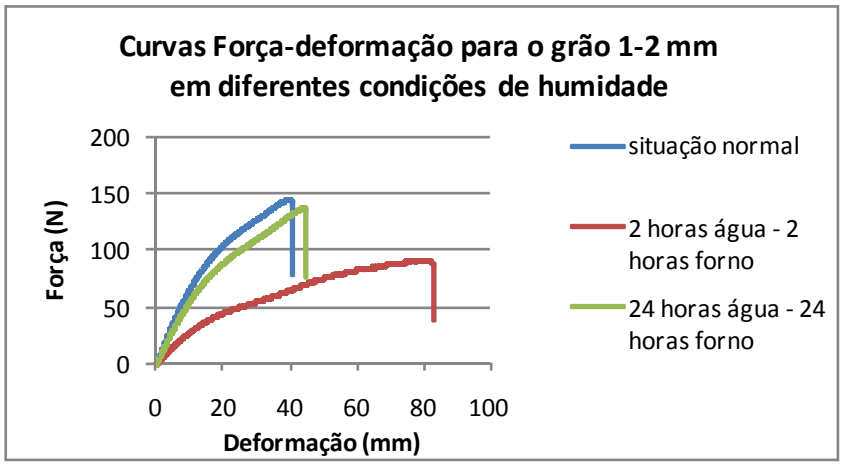


Figura 66- Curva Força-deformação para o grão 1-2mm em diferentes condições de humidade

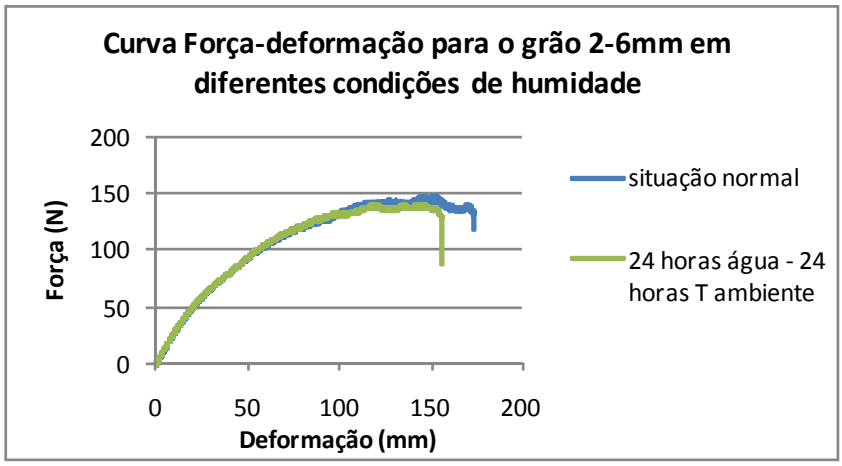


Figura 67- Curva Força-deformação para o grão 2-6mm em diferentes condições de humidade

Grão (mm)	Força máxima (N) (0,05)	Extensão máxima (mm/mm) (0,05)	Deformação máxima (mm) (0,05)	Tempo (s) (0,05)	Força de ruptura (N)	Deformação de ruptura (mm)	Extensão ruptura (mm/mm)
2-4	76,84	0,114	43,24	305	81,03	54,92	0,145
2-4 2h-2h	28,91	0,104	39,37	278	>44	>96,30	---------
2-4 24-24h	55,43	0,102	38,65	273	74,81	69,10	0,182
1-2	143,49	0,102	38,76	273	144,05	39,55	0,104
1-2 2h-2h	62,83	0,100	38,11	269	90,71	81,10	0,214
1-2 24-24h	129,49	0,105	39,82	281	136,88	44,21	0,116
2-6	133,00	0,097	101,75	359	117,69	173,15	0,165
2-6 24-24h	132,20	0,095	99,65	352	138,08	122,71	0,117

Tabela 34- Análise dos principais parâmetros na análise à flexão dos materiais de tamanho de grão 2-4 mm, 1-2 mm e 2-6 mm sujeitos a diferentes condições de humidade

	Módulo de Elasticidade à flexão (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Grão (mm)		
2-4	12,256	0,800
2-4 (2h-2h)	4,824	-------
2-4 (24h-24h)	9,488	0,669
1-2	25,929	1,288
1-2 (2h-2h)	11,257	0,881
1-2 (24h-24h)	21,090	1,224
2-6	16,511	0,714
2-6 (24h-24h)	17,423	0,819

Tabela 35- Módulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os diferentes materiais sujeitos a diferentes condições de humidade

4.5.5. Análise dos resultados

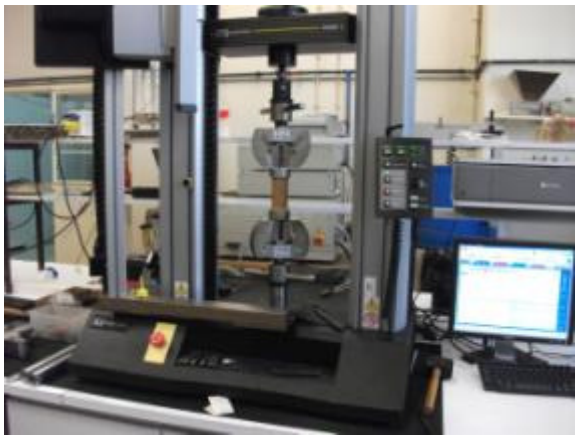
Em relação aos ensaios de flexão, os resultados obtidos diferem um pouco da análise anterior. Os provetes com material de grão 1-2 mm apresentam a maior força máxima, ou seja, é o material mais resistente durante a aplicação de carga, mas também é o que suporta menores deformações. O seu Módulo de Elasticidade é o mais elevado (25,929 MPa), o que comprova ser o mais rígido dos quatro. Por sua vez, os provetes com grão 0,2-2 mm e 2-4 mm apresentam valores muito próximos em vários parâmetros, como a força máxima, deformação, força de ruptura e no tempo de ensaio. Por fim, de salientar que o material com grão 0,2-1mm foi o que sofreu a maior deformação, embora também esteja sujeito a grandes esforços, torna-o o material mais dúctil.

Quanto ao material constituído por grãos 2-6 mm, com 20 mm de espessura, verifica-se que este atinge valores muito mais elevados em relação ao material de grão 2-4 mm com 10 mm de espessura, quanto à força máxima e de ruptura, aproximadamente o dobro, mas a deformação de ruptura chega a triplicar. Já a extensão de ruptura e a extensão máxima são muito semelhantes, havendo portanto uma relação da espessura do material com a deformação sofrida. O aumento da espessura também levou a um aumento do Módulo de Elasticidade, embora tenha diminuído a tensão de ruptura.

Com o material exposto a um ambiente com elevada temperatura, constata-se que o Módulo de Elasticidade e a tensão de ruptura mantiveram-se praticamente constantes.

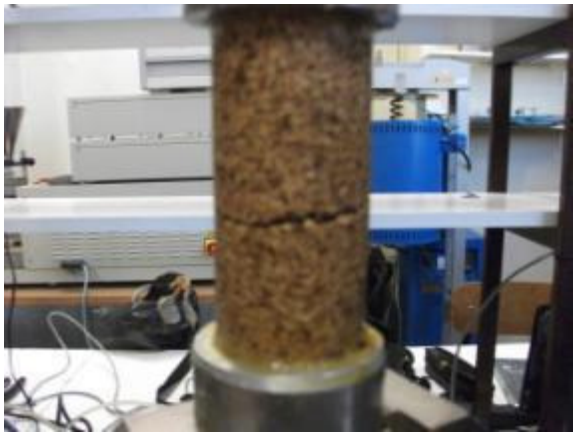
O facto do material constituído por grãos de 2 a 6 mm ter ficado com uma densidade inferior à inicial quando foi sujeito ao segundo ensaio de humidade, teve como consequência o aumento da rigidez e da tensão de ruptura, embora a sua tensão máxima e deformação sejam inferiores a um provete com as características iniciais. Para os provetes com 10 mm de espessura, verifica-se uma grande deformação quando estes foram sujeitos ao ciclo de imersão e secagem, tanto que no provete de tamanho de grão 2-4 mm não foi possível determinar a deformação de ruptura, sabendo-se apenas que será maior que a altura entre os apoios e a base para flexão. As forças máxima e de ruptura também são muito inferiores. Para os provetes que estiveram submetidos à imersão e secagem num período de 24 horas cada, a rigidez, tensões máxima e de ruptura são ligeiramente inferiores que em provetes com as condições iniciais, mas em contrapartida, a deformação é um pouco superior.

4.6. Ensaios de Tracção



a)

b)



c)

d)

Figura 68- Descrição do processo de tracção: a) condições iniciais; b) inicio do ensaio; c) inicio da ruptura; d) fim do ensaio com ruptura completa

4.6.1. Tubos de referência 45/25

Neste subcapítulo pretende-se comparar o comportamento dos provetes em tracção, com diâmetros exterior e interior de 45 e 25 mm, respectivamente. A figura 69 apresenta as curvas força-extensão em tracção dos 4 materiais com espessura de 10 mm. Nas tabelas 36 e 37 estão os valores dos principais parâmetros em análise.

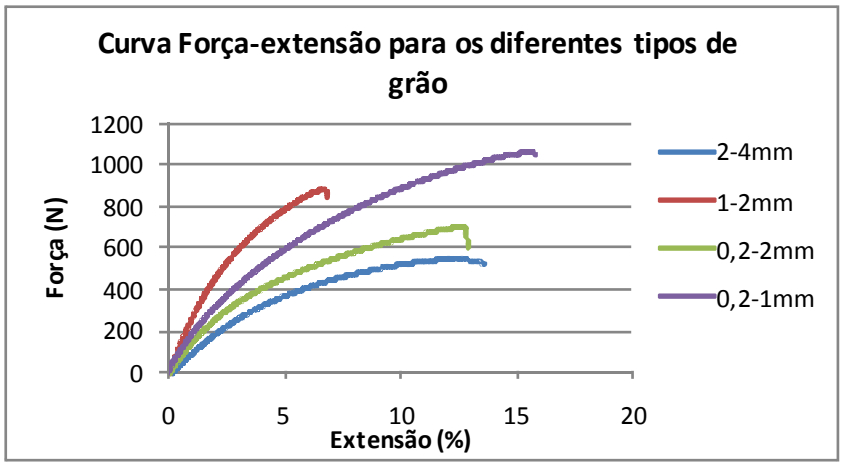


Figura 69- Curva Força-extensão para os diferentes tipos de grão no ensaio de tracção

Tamanho grão (mm)	Massa volúmica (kg/m3)	Comprimento inicial (mm)	Tensão de cedência (MPa)	Extensão ruptura (mm/mm)	Alongamento (mm)	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tempo ocorrido para ruptura(s)
0,2-1	362	90	0,51	0,157	14,73	0,96	0,97	884
0,2-2	273,7	90	0,49	0,128	11,72	0,61	0,64	703
1-2	316	90	0,66	0,068	6,62	0,78	0,80	397
2-4	212	90	0,32	0,137	10,68	0,38	0,49	640

Tabela 36- Valores dos principais parâmetros analisados no ensaio de tracção

	Módulo de Elasticidade à tracção (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Grão (mm)		
2-4	11,765	0,38
1-2	30	0,78
0,2-2	9,901	0,61
0,2-0,5/1	20	0,96

Tabela 37- Modulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os diferentes materiais

4.6.2. Tubos de referência 65/25

Na figura 70 é possível comparar as curvas força-extensão dos materiais 2-4 mm e 2-6 mm, como também nas tabelas 38 e 39, os valores obtidos do ensaio.

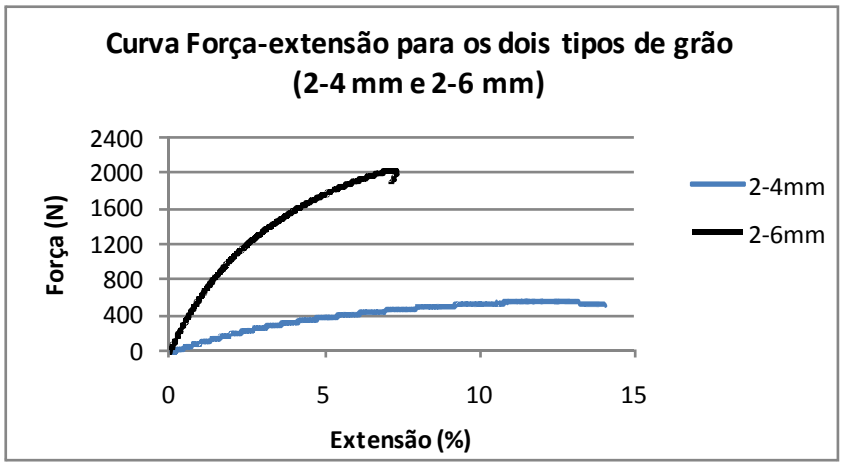


Figura 70- Curva Força-extensão para os grãos 2-4mm e 2-6mm em tracção

Tamanho grão (mm)	Massa volúmica (kg/m3)	Altura inicial (mm)	Tensão de cedência (MPa)	Extensão ruptura (mm/mm)	Alongamento (mm)	Tensão de ruptura (MPa)	Tensão máxima (MPa)
2-4	212	90	0,32	0,137	10,68	0,38	0,49
2-6	250	90	0,59	0,073	8,77	0,72	0,72

Tabela 38- Principais parâmetros de análise em tracção do grão 2-4mm e 2-6mm

	Módulo de Elasticidade à tracção (MPa)	Tensão de ruptura (MPa)
Grão (mm)		
2-4	11,765	0,38
2-6	21,780	0,72

Tabela 39- Modulo de Elasticidade e Tensão de ruptura para os grãos 2-4 mm e 2-6 mm

4.6.3. Análise dos Resultados

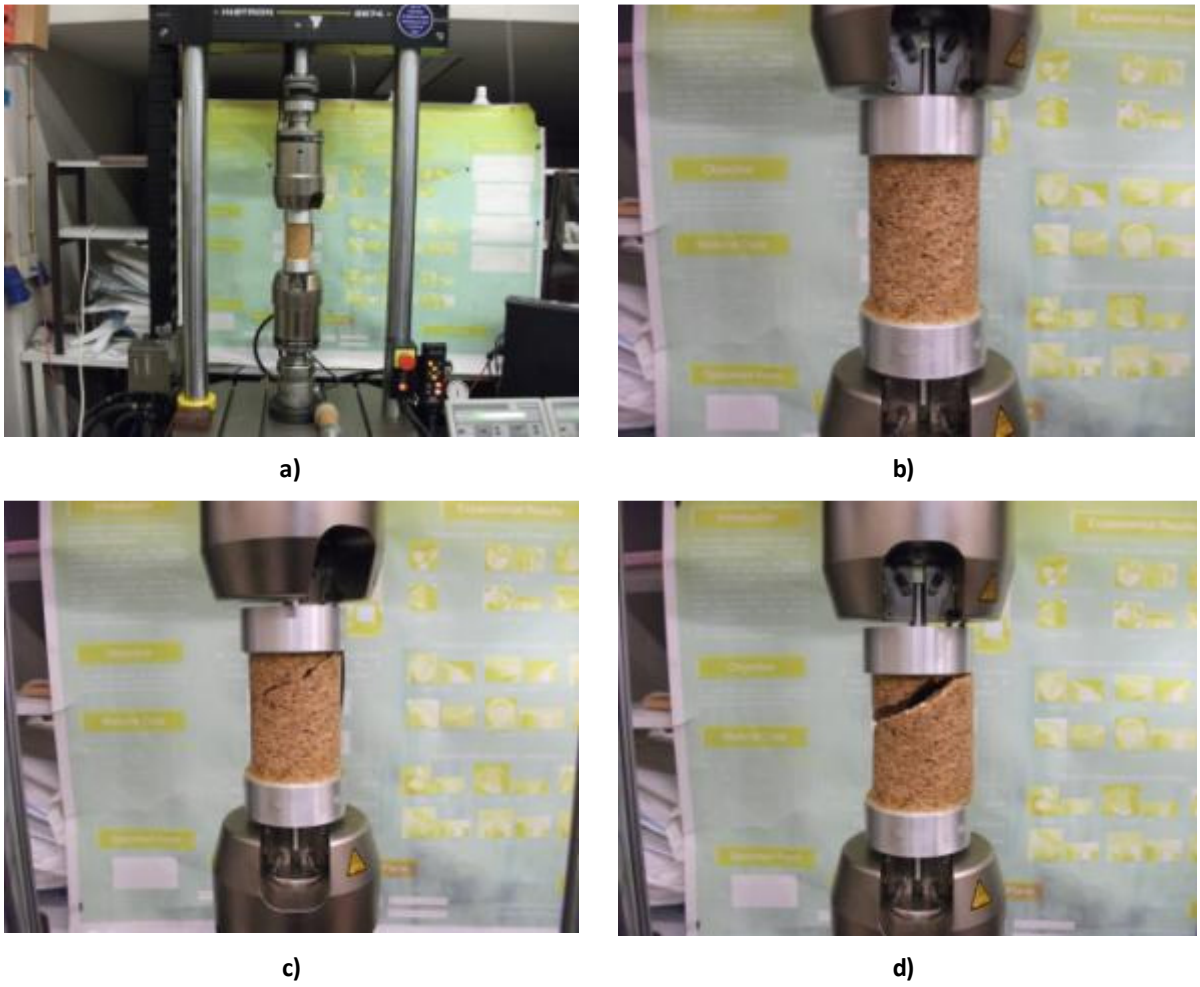
O comportamento apresentado pelos materiais sujeitos à tracção é semelhante ao comportamento dos mesmos em flexão. Verifica-se que o material de grão 1 a 2 mm atinge uma elevada tensão, cerca de 0,78 MPa, alongando-se muito pouco (6,62 mm). Por sua vez, o material de grão 0,2 a 1 mm suporta grandes cargas para que ocorra a sua ruptura, sendo também o que sofre um maior alongamento. Por fim, é necessário comparar os valores do Módulo de Elasticidade, pois o seu valor em Tracção e Flexão teria de ser aproximadamente o mesmo. Na tabela 40 são apresentados os valores que permitem concluir que o Módulo de Elasticidade em tracção e em flexão para um mesmo material são semelhantes.

Grão (mm)	Módulo de Elasticidade à tracção (MPa)	Módulo de Elasticidade à flexão (MPa)
2-4	11,765	12,256
1-2	30	25,929
0,2-2	9,901	10,323
0,2-0,5/1	20	17,529

Tabela 40-Comparação dos Módulos de Elasticidade para tracção e flexão dos materiais

4.7. Ensaios de Torção

Durante o ensaio de torção, os provetes estão submetidos a um determinado momentor torsor, onde por sua vez o material sofre uma determinada distorção, como se verifica na figura 72.



a) **b)**

c) **d)**

Figura 71- Ensaio de torção: a) condição inicial sem aplicação de qualquer binário; b) inicio do ensaio; c) inicio da ruptura; d) fim do ensaio

4.7.1. Tubos de referência 45/25

A figura 72 apresenta as curvas do Momento Torsor em função do ângulo de torção, sendo estes parâmetros determinados na tabela 41.

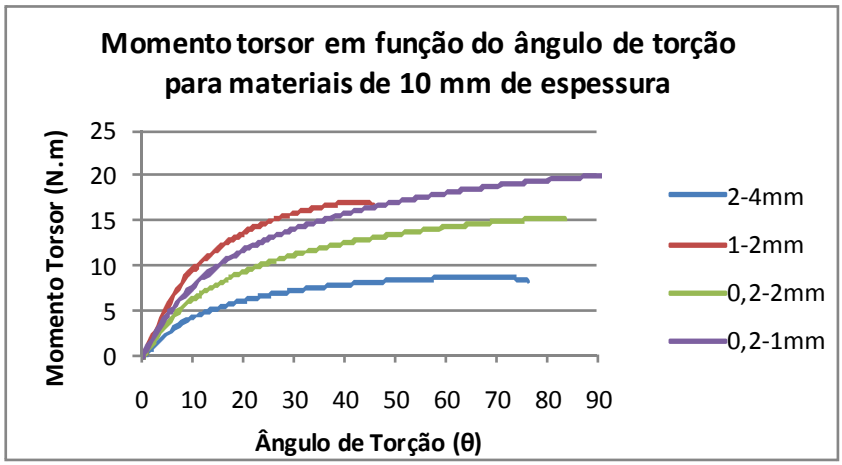


Figura 72- Momento torsor em função do ângulo de torção para materiais com 10mm de espessura de isolamento

Grão	Torque máximo (N.m)	Ângulo torção máximo θ (°)	Tensão de corte (MPa)
2-4	9,39	62,08	0,525
1-2	15,05	38,52	0,841
0,2-2	15,35	82,09	0,858
0,2-1	20,04	93,00	1,120

Tabela 41- Análise do Torque máximo e do ângulo de torção máximo para materiais com 10mm de espessura

4.7.2. Tubos de referência 65/25

A análise ao material de tamanho de grão 2-6 mm (20 mm de espessura), encontra-se representada na figura 73 e na tabela 42.

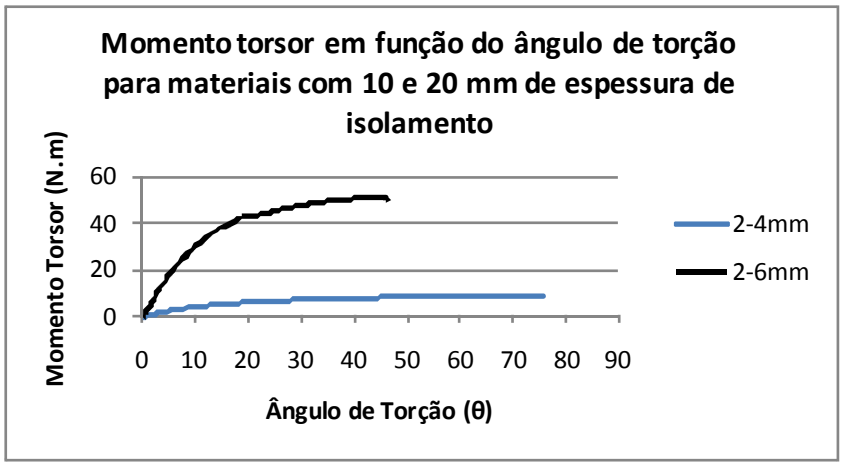

Momento torsor em função do ângulo de torção para materiais com 10 e 20 mm de espessura de isolamento
Momento Torsor (N.m)
60
40
20
0
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90
Ângulo de Torção (θ)
2-4mm
2-6mm

Figura 73- Momento torsor em função do ângulo de torsão para os grãos 2-4mm e 2-6mm

Grão (mm)	Torque máximo (N.m)	Ângulo de torção máximo θ (°)	Tensão de corte (MPa)
2-4	9,39	62,08	0,525
2-6	50,87	44,62	0,943

Tabela 42- Análise do Torque máximo e do ângulo de torção máximo para os grãos 2-4 mm e 2-6 mm

4.7.3. Analise dos resultados

Como se pode verificar pela análise das figuras 73 e 74 e das tabelas 41 e 42, o material que sofre maior distorção é constituído por grãos de tamanho a variar entre 0,2 a 1 mm, sendo também aquele em que se aplicam maiores binários. Todos têm a particular característica de a ruptura ocorrer no momento em que o torque diminui. Por sua vez, dada a maior espessura, e consequente maior diâmetro exterior do provete 2-6 mm, verifica-se que o torque é elevado relativamente aos outros provetes com 10 mm de espessura. O momento torsor máximo a aplicar nos provetes de grão 2-4 mm é o mais baixo (9,39 N.m), tendo um elevado ângulo de torção (62,08°). Já o mesmo não se verifica quando o material é constituído por grãos entre 1 a 2 mm, pois o ângulo de torção é inferior a qualquer outro tipo de material, assim como também o torque é dos mais elevados.

4.8. Análise Microscópica

Após a realização dos ensaios experimentais, foram analisadas as transformações a nível microscópico que as células da cortiça sofreram depois de realizados os ensaios. Desta forma, pretende-se verificar, se na superfície de fractura estas células continuam com a sua estrutura e dimensão originais ou quais as alterações que sofreram. No anexo H, são apresentadas imagens de todos os tipos de materiais, em diferentes zonas, como a superfície exterior do isolamento, zonas de corte forçado com objectos cortantes, neste caso uma faca, e a superfície de fractura (de todos os ensaios realizados, isto também incluindo os ensaios em que os provetes foram colocados na água para a determinação da humidade presente). Todas as células que apresentam estrutura intracelular, isto é, com corte, os cortes são visíveis na própria célula, como também mudança de forma, deixando de ter uma forma circular, passando a formas aproximadamente rectangulares.

Assim sendo, para os aglomerados 0,2-2mm e 0,2-1mm, a quase totalidade das células não sofreu qualquer tipo de corte na superfície onde se verificou a ruptura nos ensaios. Mas, pelo contrário, nos três restantes provetes, as superfícies com a ruptura resultante de todos os ensaios em todas as condições, já foi possível verificar uma estrutura intracelular.

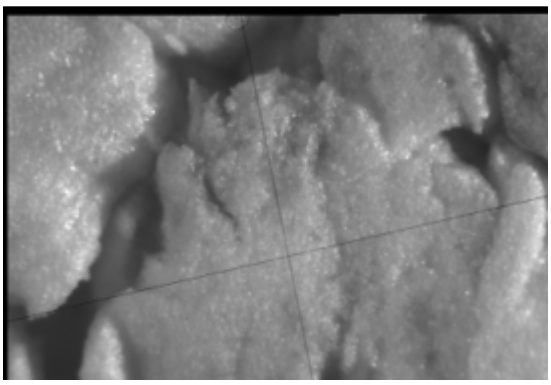


Figura 74- Observação microscópica das células de cortiça

4.9. Comparação dos materiais analisados com alguns existentes no mercado

No mercado actual existe já uma diversidade de aglomerados com diferentes aplicabilidades. Pretende-se neste subcapítulo comparar os cinco materiais analisados com alguns já existentes no mercado. Na tabela 43 encontram-se especificadas algumas das propriedades de diferentes materiais.

	2-4 mm	1-2 mm	0,2-2 mm	0,2-1 mm	2-6 mm	Aglomerado negro	Aglomerado composto para juntas	Aglomerado puro de cortiça absorvente fónico	Aglomerado composto de cortiça absorvente fónico
Cond. Térmica (W.m/K)	0,0358	0,0475	-	-	0,0596	0,060	-	-	-
Compressão (KPa)	282	489	265	618	365	>110	[340, 1035]	-	-
Flexão (KPa)	800	1200	659	1137	714	>130	-	>140	-
Tracção (KPa)	380	780	610	960	720	>60	-	-	>200
Torção (KPa)	525	841	858	1120	943	>50	-	-	-

Tabela 43- Comparação das propriedades de diferentes materiais [5]

Quanto à condutividade térmica, qualquer os dos matérias analisados têm melhor condutividade térmica que o Aglomerado negro (0,06 W.m/K). Quanto às restantes propriedades, verifica-se que todos os materiais apresentam maior resistência que os aglomerados negros, os aglomerados putos de cortiça absorvente fónico e aglomerado composto de cortiça absorvente fónico. Salienta-se que o aglomerado composto para juntas tem uma gama de valores mais alargada na resistência à compressão, sendo que o seu valor mínimo (340 KPa) é maior que a resistência dos materiais 2-4 mm e 0,2-2 mm, 282 e 265 KPa, respectivamente. A sua resistência máxima é muito superior a qualquer material analisado.

5. Conclusões e Futuros Desenvolvimentos

A realização de diferentes ensaios a nível mecânico sob as mesmas condições de ensaio, permitiu distinguir a aplicabilidade de cada um dos materiais segundo as suas propriedades. Dos cinco materiais analisados, tem-se a expectativa que dois deles revolucionem o mercado de isolamento e da própria cortiça. Tratam-se dos materiais cujo tamanho de grão varia entre 2 a 4 mm e 2 a 6 mm, com 10 mm e 20 mm de espessura, respectivamente.

Na figura 75 é possível distinguir qual dos materiais se adequa mais para uma determinada aplicação.

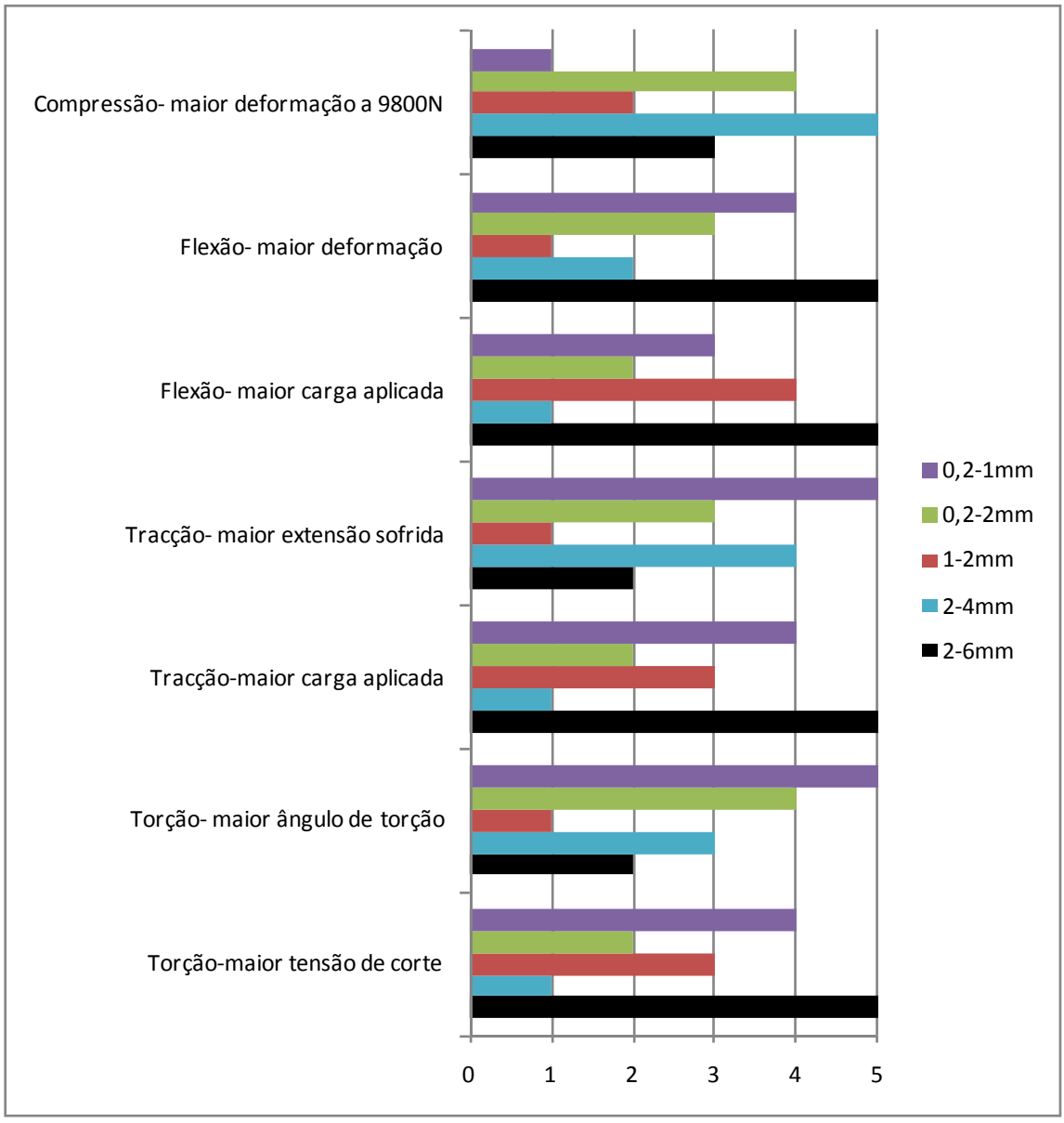


Figura 75- Lista geral de comparação para várias características dos diferentes materiais estudados

Dadas as suas características, verifica-se que um material com maior espessura será indicado quando se pretende uma maior resistência à penetração de água na sua estrutura. A produção de tubos com granulado de maiores dimensões, permite diminuir a sua resistência em qualquer campo de aplicação. Portanto, para aplicações onde se pretenda uma boa flexibilidade do material com baixos esforços a actuar, o aumento do tamanho de grão pode ser benéfico até uma determinada dimensão do grão, pois durante a deformação do tubo a elasticidade do grão é um factor essencial para uma maior deformação, sendo esta maior, quanto maior for o grão. Mas, se o granulado tiver grandes dimensões, a ruptura pode ocorrer mais rapidamente. Portanto, é um factor a ter em conta para futuras análises.

Para outros estudos, será importante avaliar o comportamento de tubos com diferentes percentagens de aglomerante aquando a produção dos mesmos, pois a elasticidade dos tubos depende da quantidade de aglomerante a utilizar, o que pode ou não ter vantagens nos diversos campos de aplicação.

Referências

[1] "Ditado popular"

[2] APCOR- Associação Portuguesa de Cortiça; "http://www.apcor.pt" (consultado em Março 2010)

[3] Gonçalves, José A. M. Ribeiro; Amaro, Ana M. de A. E Silva; Gomes, Elisabete do Amaral; Gaspar, Cristina M. P.; Matos, Cláudia S. Alegria; (2005) A Utilização e a Valorização da Propriedade Industrial no Sector da Cortiça

[4] Mendes, Américo M. S. Carvalho; (2002) A Economia do Sector da Cortiça em Portugal

[5] APCOR; (2009) A Cortiça como Material de Construção, Manual Técnico

[6] APCOR; (2009) APCOR Anuário 2009

[7] Gil, Luís; (2008) Usos Alternativos de Cortiça

[8] Pereira, Helena; Costa, Augusta; (2007) Evolução Recente da Industria de Cortiça

[9] CTTCorreios;"http://www.ctt.pt/fewcm/wcmservlet/ctt/grupo_ctt/imprensa/imprensa/imprensa61.html" (consultado em Março de 2010)

[10] Salvador, Sofia; (2001) Inovação de Produtos Ecológicos em Cortiça

[11] APCOR; (2004) Cortiça: Os factos

[12] Amorim;"http://www.amorim.com/xms/files/CorticeiraAmorim/Noticias/Susdesign_DossierInfoCortica.pdf' (consultado em Abril 2010)

[13] Fortes, Manuel Amaral; (1989) A Cortiça

[14] Fortes, M.A.; Rosa, M.E. e Pereira, H. (2004) A Cortiça, IST Press

[15] Graça, José; (2001) Os Tipos de Cortiça e os Produtos da sua Transformação Industrial

[16] Silva, S. P.; Sabino, M. A.; Fernandes, E. M.; Correlo, V. M.; Boesel, L. F.; Reis, R. L.; (2005) Cork: properties, capabilities and applications

[17] Martins, João Guerra; (2008) Isolamentos, Condições Técnicas de Execução

[18] Cork information Bureou 2009; (2009) Sector da Cortiça em Números

[19] Parreira, José J. A.; (2000) A Industrialização da Cortiça no Norte de Portugal

[20] Soares, Bruno; (2007) Estruturas Sandwich com Utilização de Núcleos de Cortiça

[21] Teles, Ana R. C. Mendes; (2000) Comportamento de Compósitos Borracha/Cortiça para Aplicação em Juntas

[22] CiênciaPT; Projecto Aerocork testa utilização de materiais de cortiça em aviões ultraleves

[23] INETI; "www.ineti.pt" (consultado em Março de 2010)

[24] Empresa Sá Rosas; CorkFlex, Isolamento em Cortiça Made in Portugal

[25] Incropera; DeWitt; Bergman; Lavine; (6^{th} edition) Fundamentals of Heat and Mass Transfer

[26] Armacell; Cálculo da Espessura de isolamento AF/Armaflex necessário para impedir a condensação

[27] "www.scribd.com" (consultado em Maio de 2010)

[28] Shigley, Joseph E.; Mischke Charles R.; Budynas, Richard G.; (7^{th} edition) Mechanical Engineering Design

[29] Programa CES EDUPACK

Anexo A- Propriedades Médias da Cortiça [13]

Tabela A 1- Propriedades Médias da Cortiça

Propriedades Médias da Cortiça	
Densidade	$170\ kg\ m^{-3}$
Módulo de Young (tracção) **R- Radial NR- Não-radial**	$E_R = 20\ MN/m^2$ $E_{\_NR} = 15\ MN/m^2$
Módulo de Young (compressão)	$E_R = 14\ MN/m^2$ $E_{\_NR} = 11\ MN/m^2$
Coeficiente de Poisson	$\nu_{R/NR} = 0.097$ $\nu_{NR/NR*} = 0.064$
Módulo de rigidez à distorção	$G_{NR} = 2{,}5\ MN/m^2$
Tensão e Extensão na cedência	$\sigma_R = 1\ MN/m^2$ $\varepsilon_R = 7\%$ $\sigma_{NR} = 0{,}8\ MN/m^2$ $\varepsilon_{NR} = 7\%$
Tensão de fractura	$\sigma_R = 1{,}5\ MN/m^2$ $\sigma_R = 1{,}2\ MN/m^2$
Coeficiente de perdas (a 2kHz)	0,1
Coeficiente de difusão (água a 20ºC)	$D_R = 5 \times 10^{-12}\ m^2\ s^{-3}$ $D_{NR} = 3 \times 10^{-12}\ m^2\ s^{-3}$
Coeficiente de difusão (água a 100ºC)	$D_R = 3 \times 10^{-10}\ m^2\ s^{-3}$ $D_R = 2 \times 10^{-10}\ m^2\ s^{-3}$
Condutividade térmica	$\lambda = 0{,}045\ W/mK$
Difusibilidade térmica	$a = 1 \times 10^{-6}\ m^2/s$
Calor específico	$C_p = 350\ J/kgK$

Anexo B- Principais propriedades de materiais plásticos [29]

Tabela B 1- Principais propriedades de materiais plásticos

	Natural materials		Thermoplastics				Thermosets		Elastomer
	Cork low density	Cork high density	Pvc	PE	Nylon	PP	Resina epox	Polyester	Rubber
Density (Kg/m^3)	120 180	160 240	1230 1240	1180 1280	1590 1610	1890 2010	1900 2100	1010 1200	910 940
Price (€/Kg)	1,97 9,82	1,97 9,82	0,703 0,782	2 2,2	4,43 4,87	0,96 1,06	2,55 2,81	2,61 2,93	1,36 1,5
Young´s modulus (GPa)	0,013 0,03	0,025 0,05	0,003 0,0035	4,83 6,21	10,8 19,2	1,49 3,07	12 14	0,293 0,308	0,001 0,0021
Flexural modulus (GPa)	0,01 0,015	0,014 0,02	0,003 0,0035	4,81 5,5	11 18	1,49 3,07	13 15	0,293 0,308	0,001 0,0021
Shear modulus (GPa)	0,0025 0,005	0,004 0,008	0,001 0,0014	1,76 2,26		0,836 0,857	4,4 5,1	0,101 0,107	3,3e-4 7e-4
Poisson's ratio (GPa)	0,05 0,45	0,08 0,4	0,48 0,49	0,367 0,382	0,331 0,349	0,383 0,39	0,32 0,36	0,435 0,452	0,499 0,5
Yield strength (MPa)	0,3 0,72	1,1 2,2	10 11	41,4 49,7	77 121	17,8 24,4	65 70	8 16,6	1,5 7
Compressive strength (MPa)	0,54 1,1	1 2	15 25	41,4 48,3	110 178	24,4 25,6	110 160	9,6 19,9	1,8 8,4
Modulus of rupture (MPa)	0,5 1,2	1 2,5	11 12	75,8 82,7	156 254	25,4 26,7	80 100	14 29	7,88 16
Elongation (% strain)	30 80	20 70	430 460	1,5 2,5	1,24 1,66	5,47 73,1	0,8 1	40 310	500 550
Fatigue strength at 10^7 cycles (MPa)	0,3 0,6	0,55 1,1	7,5 8,25	20 26	32 52	10,1 10,7	30 35	6 8,28	0,6 2,8
Fracture toughness (MPa m^5)	0,05 0,08	0,07 0,1	0,935 0,964	1,94 2,95	4,9 6,8	1,6 1,68	0,8 1,1	1,01 1,7	0,749 0,87
Maximum service temperature (ºC)	120 140	120 140	47 52	130 150	188 207	56,2 72,9	122 138	112 128	67 120
Minimum service temperature (ºC)	-73 -23	-73 -23	-60 -40	-82 -72		-17 -3	-43 7	-43 7	-75 -60
Thermal conductivity (W/m.ºC)	0,035 0,042	0,04 0,048	0,16 0,2	0,36 0,461	0,498 0,615	0,297 0,309	0,3 1	0,154 0,161	0,2 0,22
Thermal expansion coefficient (µstrain/ºC)	160 230	130 180	155 165	84,8 88,2	13,2 18,8	48,9 50,1	22 24	119 121	130 150

Anexo C- Propriedades do Poliuretano

Tabela C 1- Propriedades do Poliuretano

Density (Kg/m^3)	1040-1060	General
Price (€/Kg)	3,30-3,63	
Young´s modulus (GPa)	4,09-4,3	Mechanical Properties
Compressive modulus (GPa)	4,09-4,3	
Flexural modulus (GPa)	4,09-4,3	
Shear modulus (GPa)	1,48-1,55	
Bulk modulus (GPa)	5,83-6,12	
Poisson's ratio (GPa)	0,375-0,391	
Shape Factor	6,6	
Yield strength (MPa)	55,2-60,6	
Tensile strength	69-75,8	
Compressive strength (MPa)	66,2-72,8	
Modulus of rupture (MPa)	125-138	
Elongation (% strain)	3-6	
Hardness –Vickers (HV)	16,6-18,2	
Fatigue strength at 10^7 cycles (MPa)	25,4-33	
Fracture toughness (MPa m^5)	1,38-1,65	
Mechanical loss coefficient (tan delta)	0,0093-0,00978	
Glass temperature (ºC)	70-100	Thermal Properties
Heat deflection temperature 0,45MPa (ºC)	105-135	
Heat deflection temperature 1,8MPa (ºC)	88-93	
Maximum service temperature (ºC)	89-104	
Minimum service temperature (ªC)	-56 - -36	
Thermal conductivity (W/m.ºC)	0,304-0,316	
Specific heat capacity (J/Kg.ºC)	1680-1750	
Thermal expansion coefficient (µstrain/ºC)	90,2-92	
Electrical resistivity (µohm.cm)	3,3e18-3e19	Electrical Properties
Dielectric constant	6,54-7,19	
Dissipation factor	0,0626-0,0751	
Dielectric strength (MV/m)	15-17	
Water absorption 24 hours (%)	0,1-0,2	Permeability
Water vapor transmission (g.mm/m2.day)	0,724-4,47	
Permeability O2 (cm3.mm/m2.day.atm)	51,5-120	

Anexo D- Constituição, volume e massa volúmica dos aglomerados

Tabela D 1- Constituição, volume e massa volúmica do aglomerado 2-4 mm

Ref45/25	Granulado 2-4mm
Cola	20% Do Peso do granulado
Agua	50g por cada 10 kg de granulado
Temperatura na produção	175ºC
Velocidade da máquina	35Hz
Humidade do granulado	7%

Teste1	Peso (g)	Comp (cm)	Volume (cm3)	Massa volúmica
A	232,55	100	1099,56	211,49
B	234,42	98,5	1083,06	216,44
C	232,21	99	1088,56	213,31
D	242,21	103	1132,54	213,86
E	213,48	93	1022,59	208,76
F	257,95	108,5	1193,02	216,21
G	235,74	100	1099,56	214,39
H	244,43	100,5	1105,05	221,19
I	225,14	100	1099,56	204,75
J	235,21	98,5	1083,06	217,17
K	235,7	98,2	1079,76	218,28
L	214,76	98	1077,56	199,30
M	234,1	98,1	1078,66	217,02
N	230,51	98,6	1084,16	212,61
O	228,41	98,3	1080,86	211,32
P	229,86	99,2	1090,76	210,73
Q	231,64	99,1	1089,66	212,57
R	226,57	99	1088,56	208,13
S	221,31	99,2	1090,76	202,89
T	227,21	97,5	1072,07	211,93
U	236,01	99,1	1089,66	216,58
V	234,31	98,4	1081,96	216,55
W	239,99	105,5	1160,03	206,88
X	185,39	79,7	876,34	211,54
Y	232,87	96,6	1062,17	219,23
			M. Volúmica	212,53

Tabela D 2-Constituição, volume e massa volúmica do aglomerado 1-2mm

Ref45/25	Granulado 1-2mm
Cola	20% Do Peso do granulado
Agua	50g por cada 10 kg de granulado
Temperatura na produção	175ºC
Velocidade da máquina	35Hz
Humidade do granulado	7%

Teste2	Peso (g)	Comp (cm)	Volume (cm3)	Massa Volúmica
2A	301,45	83		
2B	264,14	81,5	896,14	294,75
2C	291,42	83,5	918,13	317,40
2D	296,12	80,5	885,14	334,54
2E	350,5	105,5	1160,03	302,14
2F	295,36	85,3	937,92	314,90
2G	288,15	82,1	902,73	319,19
2H	293,88	81,6	897,24	327,53
2I	304,65	86,1	946,72	321,79
2J	281,28	82,8	910,43	308,95
2K	255,96	81,3	893,94	286,32
2L	286,34	82,7	909,33	314,88
2M	293,05	80,6	886,24	330,66
2N	300,07	82,9	911,53	329,19
2O	233,07	67,4	741,10	314,49
			M. Volúmica	316,47

Tabela D 3- Constituição, volume e massa volúmica do aglomerado 0,2-1mm

Ref45/25	Granulado 0,2-1mm
Cola	20% Do Peso do granulado
Agua	50g por cada 10 kg de granulado
Temperatura na produção	175ºC
Velocidade da máquina	35Hz
Humidade do granulado	7%

Teste3	Peso (g)	Comp (cm)	Volume (cm3)	Massa Volúmica
1B	333,23	80,7	887,34	375,53
1F	311,15	80,8	888,44	350,21
			M. Volúmica	362,87

Tabela D 4-Constituição, volume e massa volúmica do aglomerado 0,2-2mm

Ref45/25	Granulado 0,2-2mm
Cola	20% Do Peso do granulado
Agua	50g por cada 10 kg de granulado
Temperatura na produção	175ºC
Velocidade da máquina	35Hz
Humidade do granulado	7%

Teste4	Peso (g)	Comp (cm)	Volume (cm3)	Massa volúmica
1A	213,32	80,3	882,94	241,60
1C	236,3	80,5	885,14	266,96
1D	234,37	80,3	882,94	265,44
1E	216,05	70,8	778,48	277,52
1G	245,96	70,5	775,18	317,29
			M. Volúmica	273,76

Tabela D 5-Constituição, volume e massa volúmica do aglomerado 2-6mm

Ref65/25	Granulado 2-6mm
Cola	20% Do Peso do granulado
Agua	50g por cada 10 kg de granulado
Temperatura na produção	175ºC
Velocidade da máquina	35Hz
Humidade do granulado	7%

Teste5	Peso (g)	Comp (cm)	Volume (cm3)	Massa volúmica
A	1441,2	200	5654,88	254,8595
B	1430,5	200	5654,88	252,9673
C	1426,2	200	5654,88	252,2069
D	1434,1	200	5654,88	253,604
E	1457,3	200	5654,88	257,7066
F	1434,2	200	5654,88	253,6217
			M. Volúmica	254,161

Anexo E- Normas de produção

Anexo E1- Norma Portuguesa NP 115

Norma portuguesa NP 115
Norme internationale ISO 2030

Titulo

Cortiça, Granulados. Determinação da granulometria por peneiração mecânica

Objectivo e campo de aplicação

A presente norma destina-se a fixar o processo para a determinação da granulometria dos granulados de cortiça não submetidos a qualquer prensagem.

Resumo do processo

Peneiração mecânica de uma toma de ensaio em condições determinadas.
Pesagem de cada fracção retida.

Aparelhos e utensílio

Serie de peneiros constituída por:

- Tampa perfeitamente adaptável aos peneiros
- Sequência de peneiros, com aberturas nominais de malha que tenham pelo menos as seguintes dimensões relativamente ao granulado a ensaiar:
    1. Dimensão imediatamente superior a do granulado
    2. Maior dimensão
    3. Dimensão média
    4. Menor dimensão
    5. Dimensão imediatamente inferior a do granulado
    6. Dimensão do pó
- Fundo perfeitamente adaptável aos peneiros

Vibrador capaz de produzir 300 vibrações verticais com uma amplitude de cerca de 5mm. Dotado simultaneamente de movimento de rotação

Cronómetro com incerteza de 1 minuto

Balança com incerteza de 0.05g

Amostra para ensaio

Retiram-se da amostra homogénea para ensaio 3 provetes com:
50g cada para os granulados com massa volúmica igual ou inferior a 60kg/m3
100g cada para os granulados que tenham uma massa volúmica superior a 60kg/m3

Ensaio

Pesam-se os vários peneiros a utilizar bem como o fundo
Forma-se uma coluna constituída pela sequência de peneiros convenientes e o fundo
Coloca-se o provete no peneiro superior fechando-se a coluna com a tampa
Instala-se a coluna de peneiros no vibrador que se põe em funcionamento durante 10+1 min
Desmonta-se a coluna de peneiros e pesam-se todos os conjuntos (peneiro ou fundo + granulado)

Repetem-se do segundo ao quinto ponto para cada um dos provetes

Resultados

Segundo a norma portuguesa:
Mg a massa do provete de granulado de cortiça, expresso em grama e arredondado as decimas
Mc a massa de um dado peneiro i com o granulado nele retido, expresso em grama e arredondado as decimas
Mi a massa de um dado peneiro i, expressa em grama e arredondado as decimas
Mf a massa do fundo, expresso em grama e arredondado as decimas
Mp a massa do fundo com o granulado nele retido expresso em grama e arredondado as decimas

A percentagem, em massa, de granulado retido em cada peneiro é dada por:

$$\frac{Mc - Mi}{Mg} \times 100$$

A percentagem, em massa, de pó é dada por:

$$\frac{Mp - Mf}{Mg} \times 100$$

Segundo a norma francesa, a diferença reside nas expressões, em que:
Mo=Mg
Mi=Mc-Mi= massa de granulado retido no peneiro
Mf=Mp-Mf= massa do granulado nele retido

O resultado final é a média aritmética dos valores determinados para os 3 provetes de ensaio.

Anexo E2- Norma Portuguesa NP 606

Norma portuguesa NP 606
Norme internationale ISO 2190

Titulo

Granulados de cortiça. Determinação da humidade

Objectivo e campo de aplicação

A presente norma destina-se a fixar o método para determinar a humidade dos granulados de cortiça

Aparelhos e utensílios

- Balança, capaz de pesar o recipiente com o provete com uma incerteza de 0,2g
- Estufa, termostaticamente regulável, capaz de manter a temperatura de 103+2ºC
- Recipientes abertos com dimensões que possibilitem uma altura de granulado de cerca de 50mm
- Exsicador com dessecante eficaz

Preparação de provetes

Da amostra para laboratório, retiram-se ao acaso, dois provetes, cada um constituído por:

- 20g quando o granulado tenha massa volúmica inferior a 60kg/m3
- 40g quando o granulado tenha massa volúmica igual ou superior a 60kg/m3

Técnica

Levam-se os recipientes a estufa, a 103ºC, durante um período mínimo de 30 minutos. Levam-se ao exsicador durante 30 minutos e de seguida determina-se a sua massa

Introduzem-se os provetes nos recipientes, distribuindo-os de modo a que a sua superfície fique nivelada horizontalmente e com uma altura de cerca de 50mm. Determina-se a massa dos conjuntos

Colocam-se estes conjuntos na estufa a 103ºC, num período mínimo de 2 horas. Retira-se da estufa, deixa-se arrefecer no exsicador, durante 30 minutos, determinando-se, em seguida, a massa.

Repete-se o terceiro ponto ate que duas determinações consecutivas da massa dos conjuntos, não difiram mais de 0,5%

Resultados

M1 é a massa do recipiente contendo o provete antes da secagem, expressa em grama arredondado a 0,5g
M2 é a massa do recipiente contendo o provete depois da secagem, expressa em grama arredondado a 0,5g
M3 é a massa do recipiente, expressa em grama arredondado a 0,5g

$$\frac{M1 - M2}{M1 - M3} \times 100$$

O resultado do ensaio é dado pela média aritmética das percentagens obtidas para cada provete, arredondada as unidades

Anexo E3- Norma Portuguesa NP 1994

Norma portuguesa NP 1994

Titulo

Cortiça. Triturados. Classificação e características

Objectivo e campo de aplicação

A presente norma destina-se a fixar a classificação e as características dos triturados de cortiça

Definição

Triturados: fragmentos, de dimensão variável, geralmente compreendida entre 0,250mm e 12mm, obtidos por simples trituração e calibração sumaria, provindo de cortiça em bruto, semi-preparada, transformada por simples talha ou de aparas, podendo ser classificados por granulometria e/ou pelo tipo de matéria-prima utilizada na sua fabricação

Classificação e características

Os triturados de cortiça são classificados em função das características granulometricas e/ou pelo tipo de matéria-prima utilizada na sua fabricação

Classificação segundo as características granulometricas

Os triturados de cortiça são classificados pela distribuição granulometrica obtida após ensaio de acordo com a norma NP 115, de acordo as aberturas superior e inferior dos peneiros utilizados, para os quais a retenção seja pelo menos de 90%

Classificação segundo o tipo de matéria-prima utilizada na fabricação

Humidade: O triturado de cortiça diz-se comercialmente seco se a sua humidade, determinada de acordo com a norma NP 606 não exceder os 14%

Designação

Os triturados de cortiça designam-se pela sua granulometria (máxima e mínima), em milímetro. A massa volúmica deve ser indicada pelo fabricante, calculada de acordo com a norma NP 605 e utilizando apenas recipiente de 2dm3 nela referido.

Acondicionamento

Os triturados podem ser acondicionados em fardos ou em sacos, obrigatoriamente marcados com a respectiva designação.
Os triturados acondicionados em fardos são comprimidos e fixados com arames de ferro ou cintas metálicas, podendo utilizar-se ripas de madeira como reforço suplementar.
A tara dos fardos não deve ultrapassar 5% da massa total sem as ripas de madeira ou 10% com as ripas de madeira.
Os fardos devem ter, alem de outras marcas exigidas, a indicação do nome ou marca comercial do produtor e/ou do exportador assim como o nome do país exportador

Composto de cortiça aglomerada norma ISO 4714

Os compostos de cortiça aglomerada são classificados de acordo com a sua massa volúmica em cinco classes de acordo com a tabela que especifica o mínimo de resistência á tracção requerida para cada uma delas.

Classe	Massa volúmica Kg/m3	Resistência mínima à tracção MPa
A	M <220	0,20
B	220<M <270	0,25
C	270<M <320	0,35
D	320<M <380	0,45
E	M> 380	0,60

Classificação dos compostos de cortiça quanto à massa volúmica

Aglomerado expandido de cortiça para isolamento térmico, características Norma ISO 2219

Dimensões

Comprimento: 1000mm
Largura: 500mm
Espessura mínima 25mm

Tolerâncias

Comprimento: 3mm
Largura: 1,5mm
Espessura: 1mm se espessura está entre 25 e 50mm
2% da espessura para espessura maior que 50mm

Tensão de ruptura por flexão
(ISO 2077)
A tensão mínima de ruptura por flexão, deve ser 140KPa.

Condutividade térmica

a) 0ºC k=0,04
b) 20ºC k=0,042
c) 40ºC k=0,044

Humidade

(ISO 2066) não deve passar dos 4%

Embalagem

As placas ou painéis deverão ser enviados em embalagens apropriadas, para assegurar o seu transporte até o destino sem danos.
Salvo acordo em contrário, é proibida a instalação no mesmo pacote, placas ou painéis de diferentes

Marca

Embalagem deve ser ou pode ser lido, seguindo as indicações:

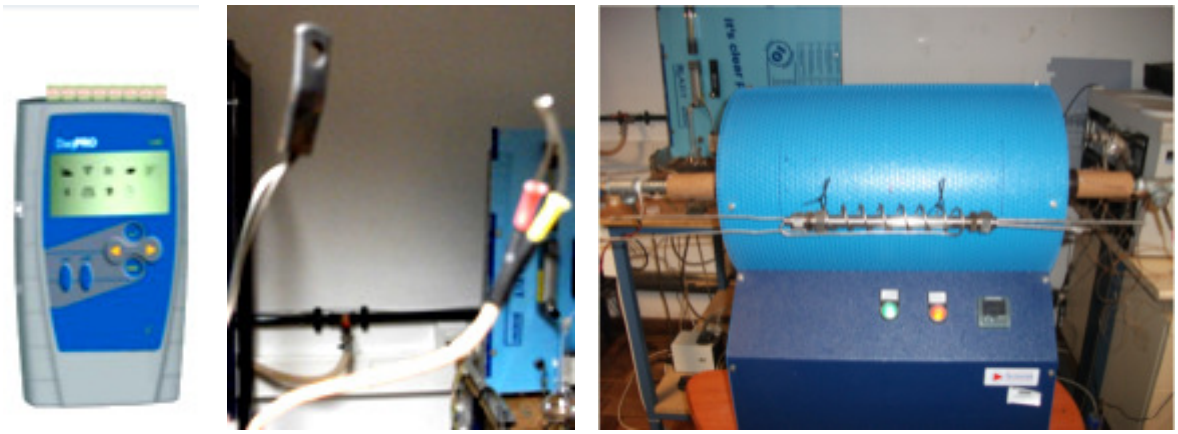
a) A identificação do produto
b) O nome, firma e endereço do fabricante ou o seu logótipo
c) O país de origem

Anexo F - Ensaio de condutividade térmica no DEM

Anexo F1- Modo de preparação do ensaio

De todos os ensaios, o ensaio de condutividade térmica é o mais complexo, pois além da sua instalação, é necessário recorrer a cálculos complexos para a determinação do coeficiente de condutividade térmica. No laboratório situado no pavilhão I de Mecânica, no Instituto Superior Técnico, existe um forno onde se podem colocar tubos de comprimento mínimo de 600mm e diâmetro máximo 52 mm. Os resultados obtidos não foram satisfatórios, isto porque o método utilizado não permitiu determinar valores concretos, simplesmente aproximações. Dado isto, os resultados vão em anexo como curiosidade. O procedimento de montagem foi o seguinte:

- Tubos para o ensaio com 800mm de comprimento e diâmetro de 45mm;
- Um tubo interior onde passará a agua com diâmetro exterior ligeiramente inferior, cerca de 2mm, do diâmetro interior do tubo de cortiça;
- Duas ligações em T, que enroscam nas duas extremidades do tubo onde circula a agua, estando instalado no interior dos dois, termopares para medir a temperatura de agua na entrada e saída do tubo, dado que não foi possível determinar a temperatura da agua à entrada, fizeram-se constantemente analises à temperatura da agua durante os ensaios;
- Colocação de 3 termopares no exterior do tubo de circulação de água;
- Posicionamento do tubo referido atrás, dentro do tubo de cortiça, colocando mais 4 termopares na superfície exterior do tubo de cortiça;
- Fixação do conjunto num outro tubo de maior diâmetro que o diâmetro exterior do tubo de cortiça, sendo assim colocado dentro do forno.
- Todos os valores obtidos por meio dos termopares, eram registados no computador, por intermédio de um aparelho (OMEGA DAQPRO).
- A água a circular tinha o seguinte trajecto: torneira aberta, a água passava pelo caudolimetro, onde se regulava o seu caudal, finalmente, continuava a sua circulação pelos tubos, sendo a sua saída efectuada para os esgotos.
- A temperatura do forno foi definida, sendo que os para os ensaios, definiram-se as temperaturas de 60, 100 e 150ºC.
- Definiram-se como temperaturas finais nas superfícies e na saída de água quando estas estabilizavam, ou seja, quando no gráfico as temperaturas ao longo do tempo eram constantes.



a) b) c)

Figura F 1- a) OMEGA DAQPRO; b) termopar; c) forno

A colocação dos termopares seguiram uma determinada ordem, como é possível ver na figura F2.

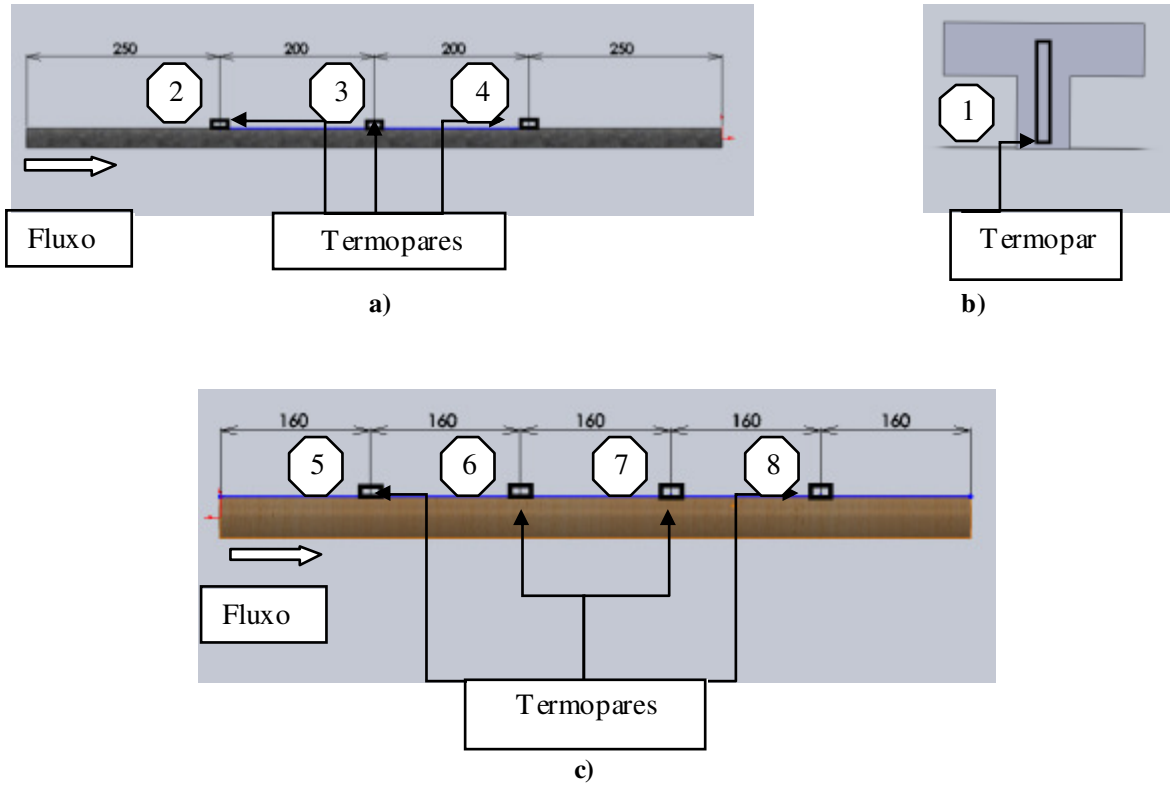


Figura F 2- Localização dos termopares: a) termopares exteriores do tubo de escoamento; b) termopar no cotovelo da tubagem; c) termopares exteriores do material em análise

Avaliação da Amostra (2-4 mm)	
Diâmetro interno médio do isolamento (D_0)	25 mm
Diâmetro externo médio do isolamento (D_2)	45 mm
Comprimento Útil (L)	800 mm
Densidade do isolamento	213 Kg/mm^3

Tabela F 1- Condições iniciais da amostra de tamanho de grão 2-4mm

Avaliação da Amostra (1-2 mm)	
Diâmetro interno médio do isolamento (D_0)	25 mm
Diâmetro externo médio do isolamento (D_2)	45 mm
Comprimento Útil (L)	800 mm
Densidade do isolamento	316 Kg/mm^3

Tabela F 2- Condições iniciais da amostra de tamanho de grão 1-2mm

Anexo F2- Resultados

Os valores obtidos resultam da estabilidade de todas as temperaturas, que se pode verificar nos gráficos em anexo. Para temperaturas exteriores (dentro do forno) de 60ºC, 100ºC e 150ºC foi possível definir as temperaturas mais importantes, as temperaturas da água à entrada e saída do tubo e as temperaturas interior e exterior do tubo de isolamento.

Grão	Caudal (g/s)	Temperatura de entrada de água	Temperatura de saída de água (1)	Temperatura da superfície exterior do tubo de cortiça (6,7)	Temperatura da superfície exterior do tubo de escoamento (3,4)	Condutividade térmica
2-4mm	2	21,3	22,42	52,12	24,59	0,064
2-4mm	2	22,4	26,72	100,51	33,15	0,100
2-4mm	5,5	21,4	25,11	141,88	31,69	0,145
1-2mm	5,5	21,6	22,4	61,55	22,63	0,089
1-2mm	5,5	20,4	22,8	110,10	26,06	0,123

Tabela F 3- Temperaturas determinadas no ensaio e condutividade correspondente

$$q = Q.C_p.(T_s - T_i) \quad \text{(F1)}$$

$$k = \frac{q.\ln(D_2/D_0)}{(T_{s_{ext}} - T_{s_{int}}).2.\pi.L} \quad \text{(F2)}$$

Com base numa equação resultante da recta tangente ao gráfico da temperatura da superfície exterior do tubo em função da condutividade térmica, é possível se obter o valor da condutividade em função da temperatura da superfície exterior.

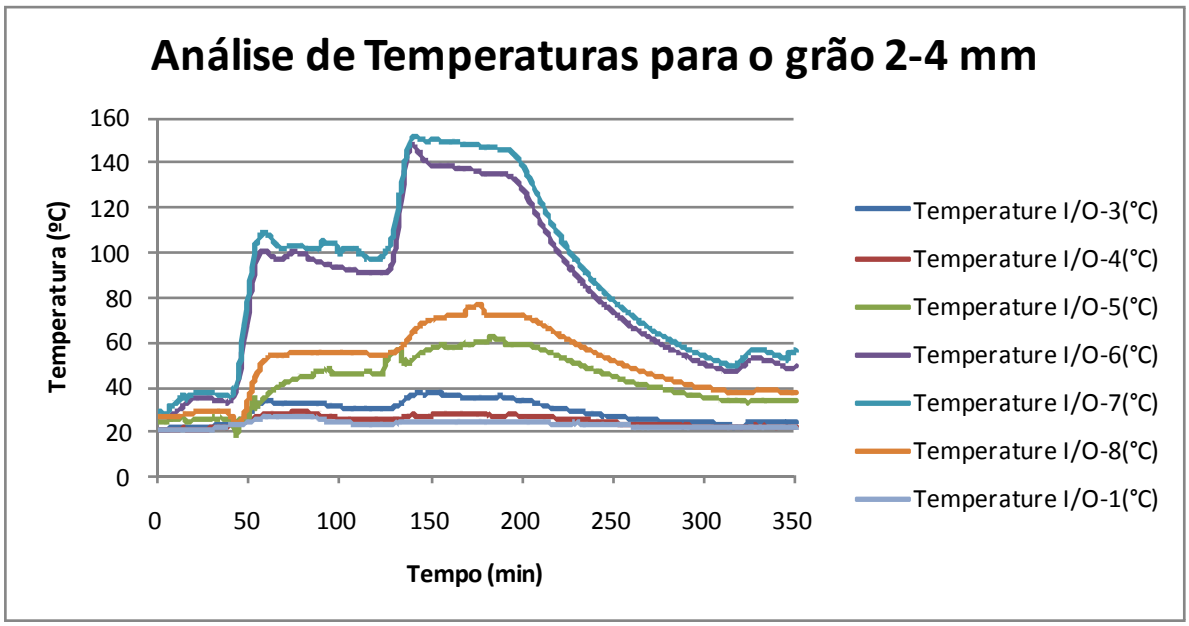


Figura F 3- Análise de Temperaturas para o grão 2-4 mm

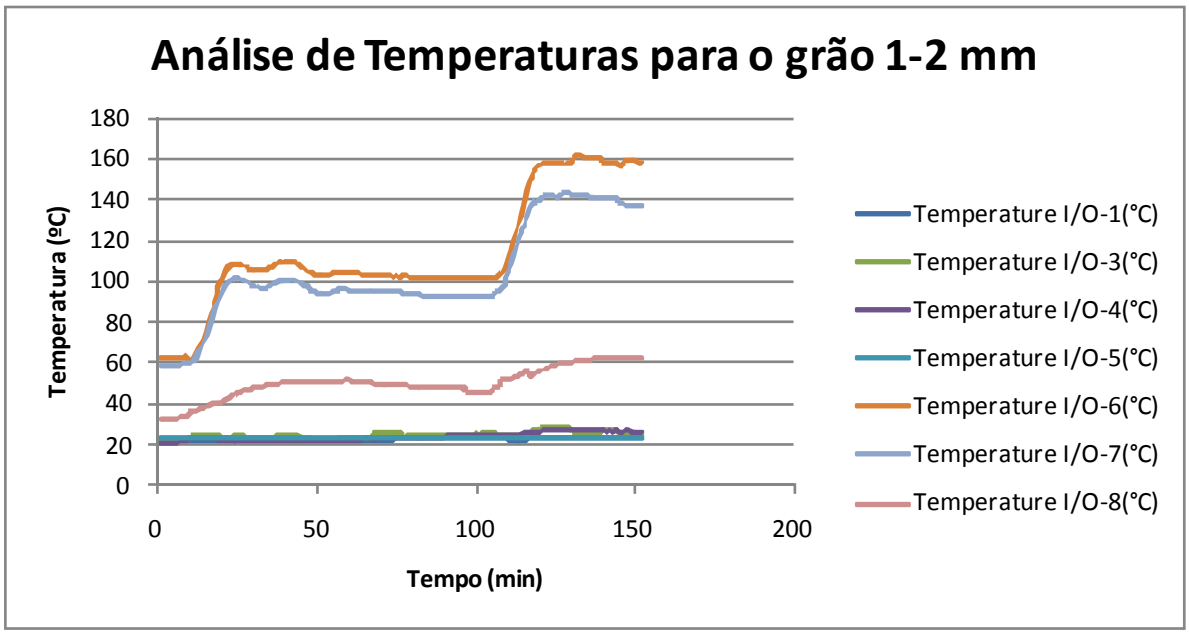
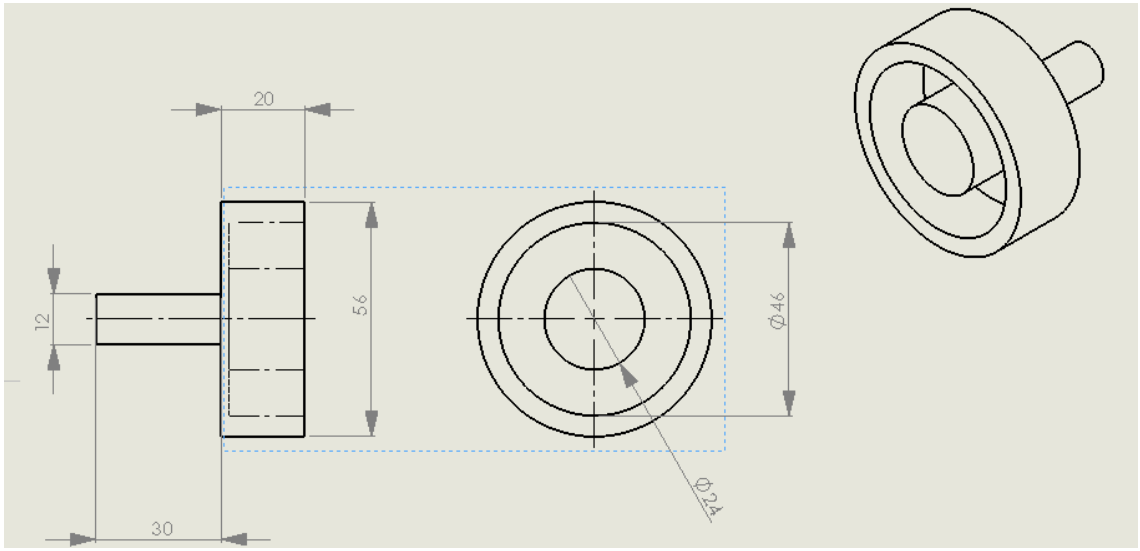
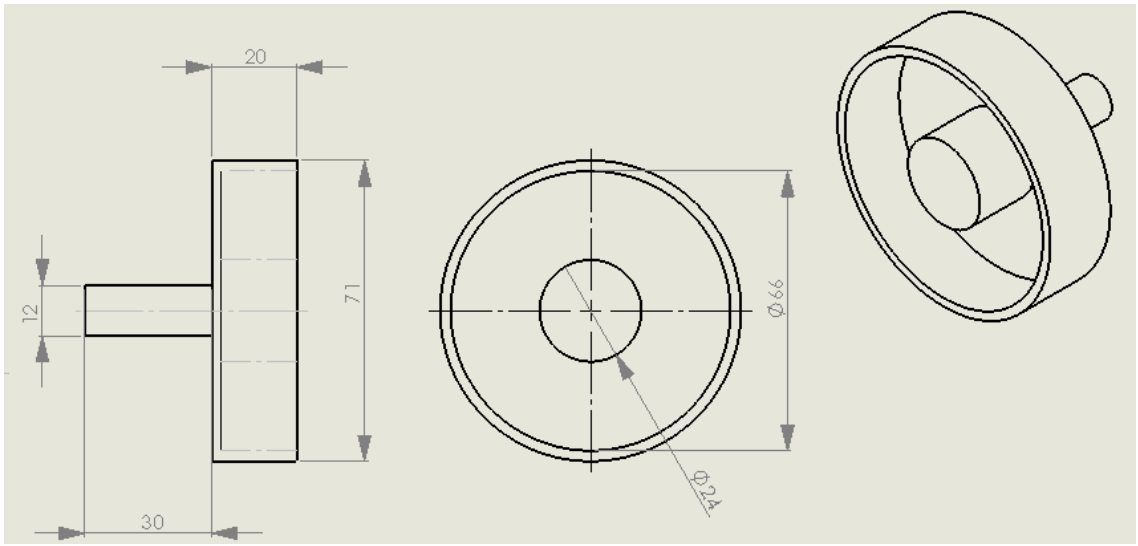


Figura F 4- Análise de temperaturas para o grão 1-2 mm

Anexo G- Dimensões dos apoios para os provetes para os ensaios de tracção e torção



a)

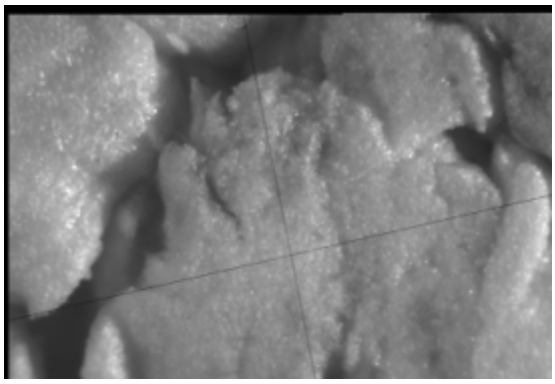


b)

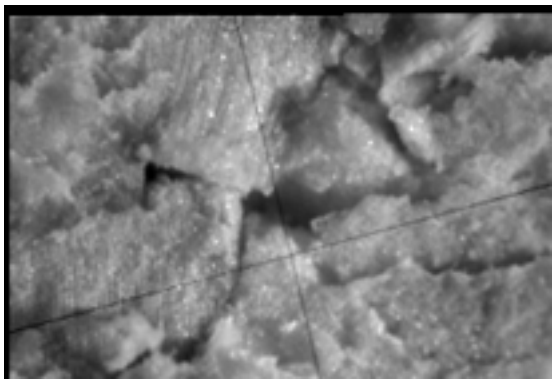
Figura G 1- Dimensões dos apoios; a) para provetes com 45mm diâmetro exterior; b) para provetes com 25mm de diâmetro exterior

Anexo H- Analise microscópica

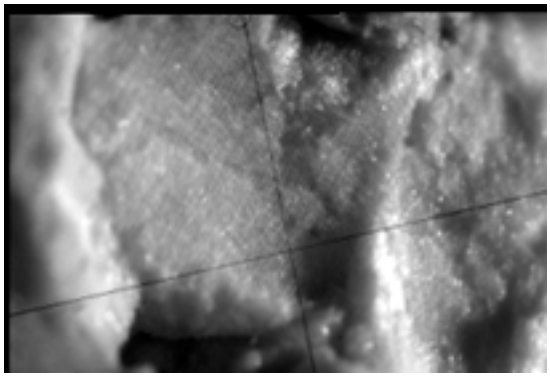
Anexo H1- Grão 2-4 mm



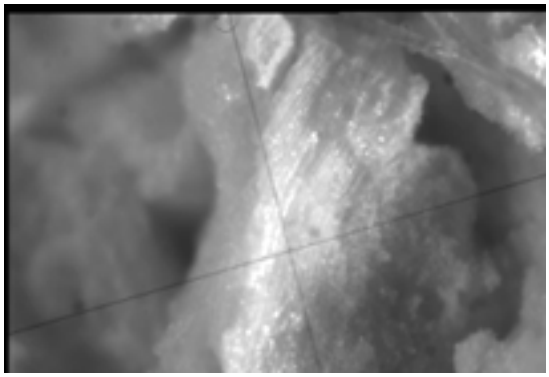
a)Superfície exterior



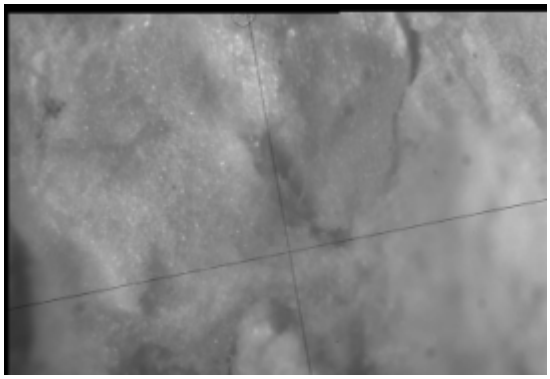
b) Superfície com corte navalha



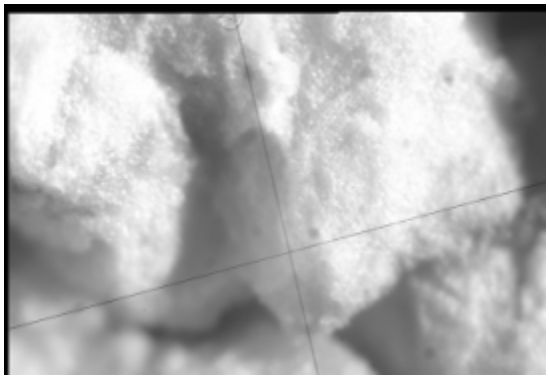
c) Superfície corte por torção



d) Superfície corte por tracção

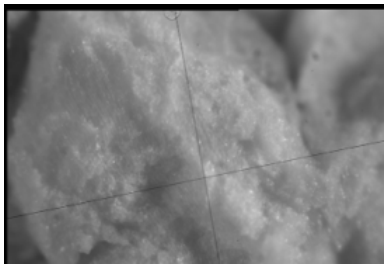


e) Flexão normal



f) Flexão quando material sujeito a 150ºC

NÃO SE VERIFICOU RUPTURA

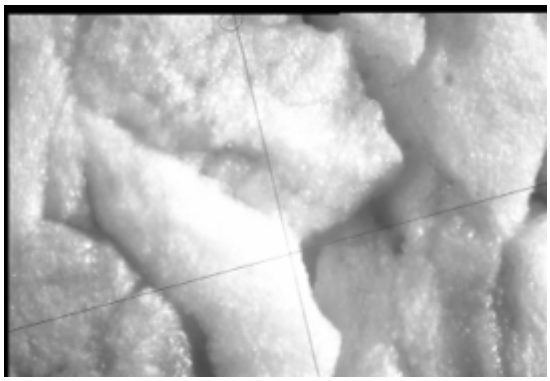


g) Flexão sujeito a ensaio de humidade 2h-2h

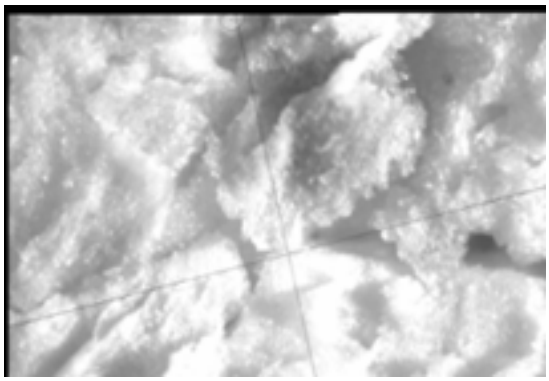
h) Flexão sujeito a ensaio de humidade 24h-24h

Figura H 1- estrutura celular do grão 2-4 mm

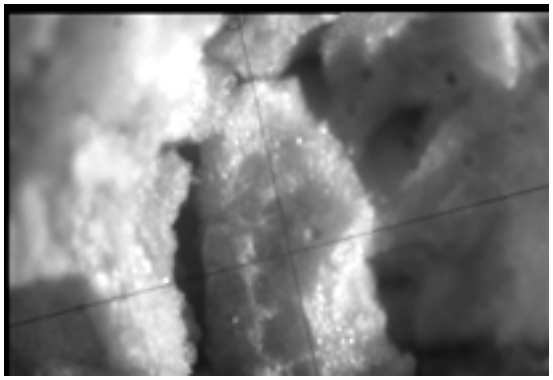
Anexo H2- Grão 1-2 mm



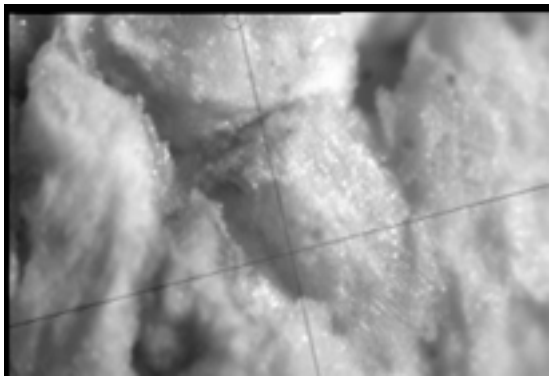
a) Superfície exterior



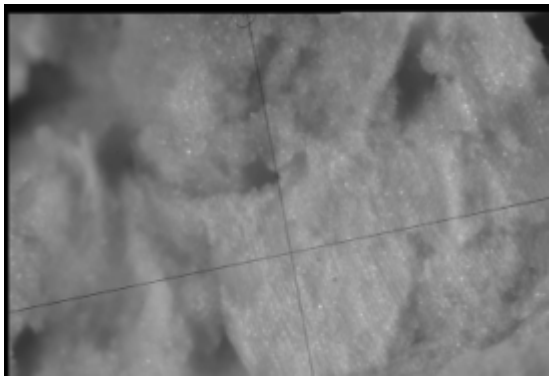
b) Superfície com corte navalha



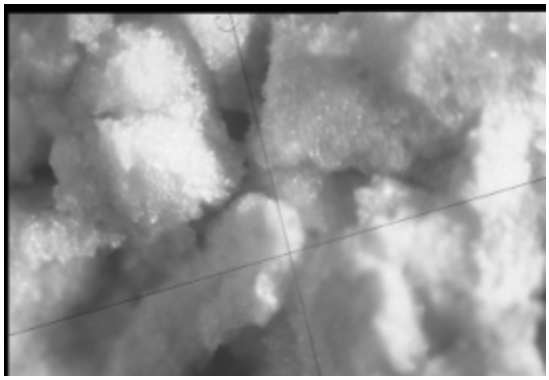
c) Superfície corte por torção



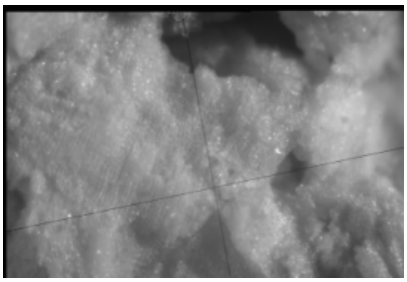
d) Superfície corte por tracção



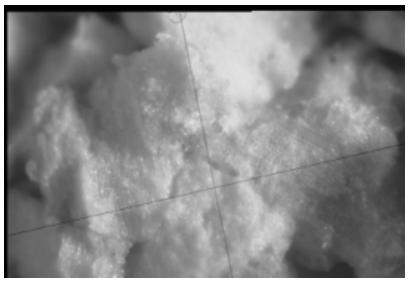
e) Flexão normal



f) Flexão quando material sujeito a 150ºC



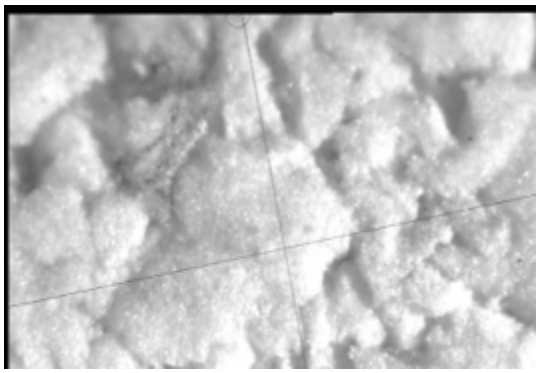
g) Flexão sujeito a ensaio de humidade 2h-2h



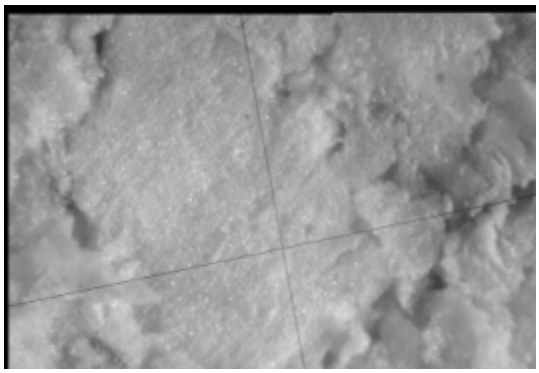
h) Flexão sujeito a ensaio de humidade 24h-24h

Figura H 2- Estrutura celular do grão 1-2 mm

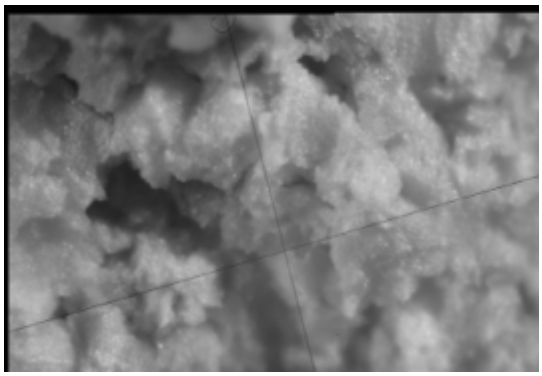
Anexo H3- Grão 0,2-2 mm



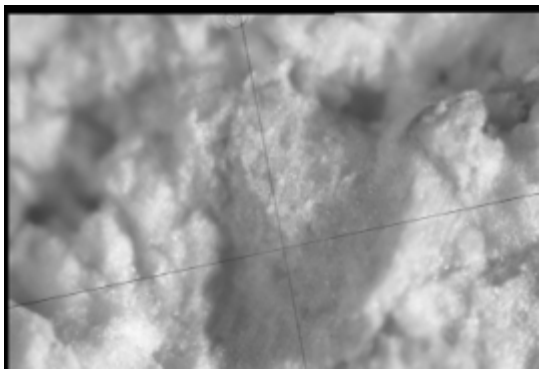
a) Superfície exterior



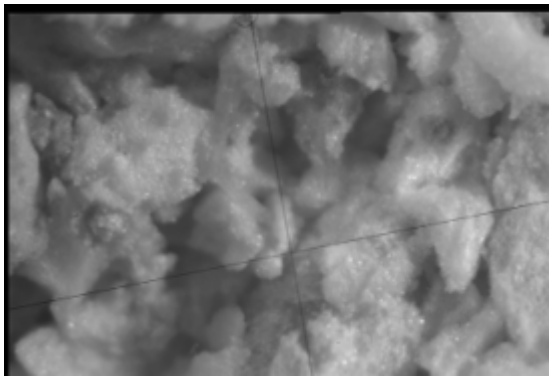
b) Superfície com corte navalha



c) Superfície corte por torção



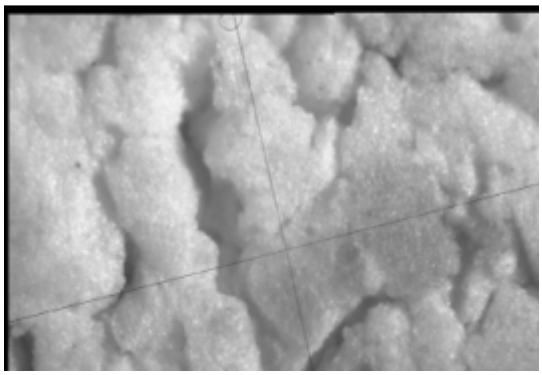
d) Superfície corte por tracção



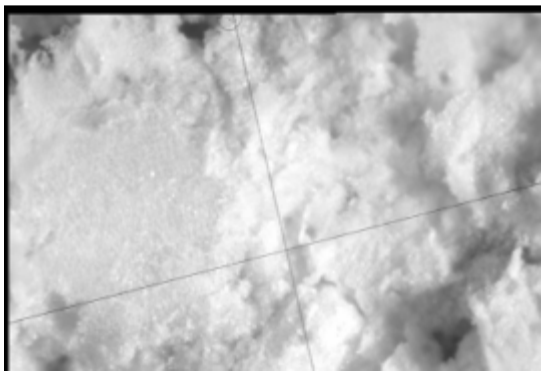
e) Flexão normal

Figura H 3- Estrutura celular do grão 0,2-2 mm

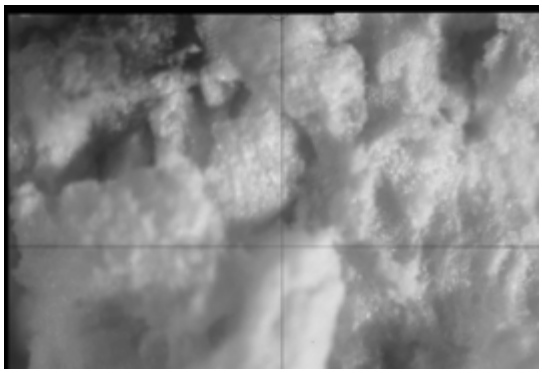
Anexo H4- Grão 0,2-1 mm



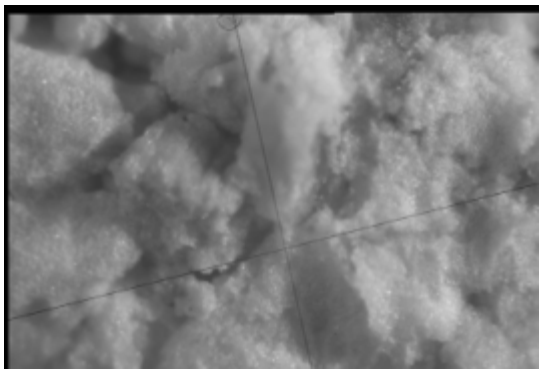
a) Superfície exterior



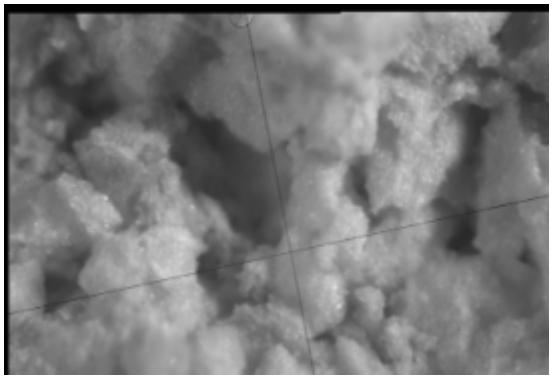
b) Superfície com corte navalha



c) Superfície corte por torção



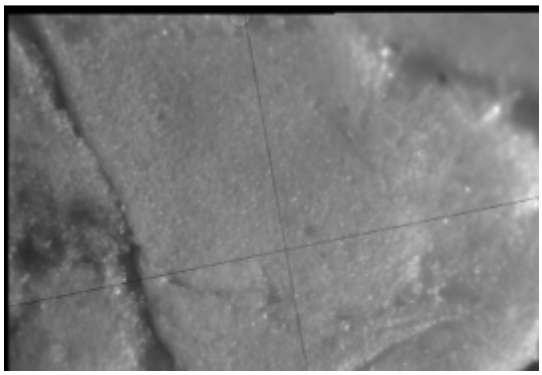
d) Superfície corte por tracção



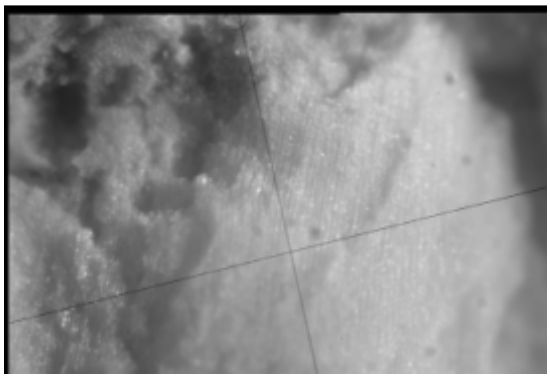
e) Flexão normal

Figura H 4- Estrutura celular do grão 0,2-1 mm

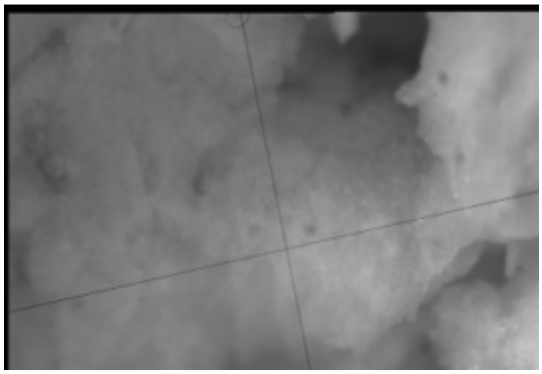
Anexo H5- Grão 2-6 mm



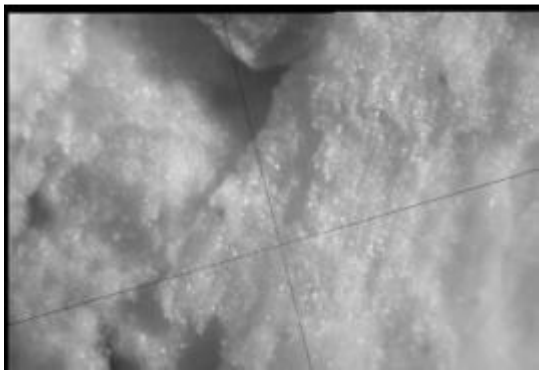
a) Superfície exterior



b) Flexão sujeito a ensaio de humidade 24h-24h



c) Superfície corte por torção



d) Superfície corte por tracção

Figura H 5- Estrutura celular do grão 2-6 mm